

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.2.1. Penelitian terdahulu tentang desain hubungan tiang dengan *pile cap*

Desain tulangan penghubung tiang dengan *pile cap* saat ini masih terus dikaji untuk mendapatkan desain yang paling efektif untuk menahan berbagai macam beban. Penelitian-penelitian mengenai desain hubungan fondasi tiang dengan *pile cap* terus dilakukan, seperti penelitian yang dilakukan Wang dkk. (2014) untuk menganalisis perbandingan desain tulangan pada hubungan *pile cap* dengan *PHC pile* (*prestressed high-strength concrete pile*) terhadap beban seismik. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk membandingkan kapasitas enam macam desain tulangan dengan pengujian di laboratorium dan permodelan di ABAQUS. Pengujian dilakukan dengan pembebanan arah aksial dan lateral. Pembebanan aksial pada penelitian laboratorium dilakukan dengan bantuan *hydraulic jack* sebesar 1000 kN secara bertahap dengan interval 250 kN, sedangkan pembebanan lateral dilakukan dengan bantuan *hydraulic actuator* dengan kapasitas 600 kN. Hasil penelitian menunjukkan kerusakan yang terjadi pada semua model adalah jenis kerusakan tekukan, kapasitas dan kekakuan model dengan tulangan penghubung lurus lebih baik dan dapat menghemat pengeluaran biaya dalam pelaksanaan di lapangan. Kapasitas untuk menahan rotasi yang lebih kuat ditunjukkan oleh model dengan tulangan penghubung bengkok dengan bengkokan 75°. Selain itu, kekuatan dan kekakuan dari model tulangan penghubung yang dibengkokkan dan dilas pada kepala tiang tidak dipengaruhi secara signifikan oleh beban aksial, diameter tulangan penghubung, jumlah tulangan penghubung, dan panjang tulangan penghubung, sementara model dengan tulangan penghubung yang dibengkokkan dan ditanam ke dalam tiang dipengaruhi secara signifikan oleh hal-hal tersebut.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Guo dkk. (2017), namun variasi desain penghubung tiang ke *pile cap* yang diuji hanya tiga macam. Pembebanan pada pengujian diberikan pada arah lateral dan aksial sebesar 228,8 kN menggunakan *hydraulic jack*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua variasi desain penghubung mengalami keruntuhan akibat lentur. Model pertama dengan desain

penghubung tulangan penghubung bengkok dengan bengkokan 75° mengalami kerusakan akibat pelelehan tulangan penghubung dan retak pada *pile cap*. Kemudian model kedua dengan tambahan perkuatan cincin mengalami kerusakan akibat retak pada cincin penguat dan *PHC pile*. sedangkan pada model ketiga dengan tambahan baja berbentuk T pada tiang mengalami kerusakan akibat retak pada *pile cap* dan *PHC pile*. Hasil permodelan dengan ABAQUS juga menunjukkan hasil kerusakan yang sama dengan pengujian di laboratorium. Selain itu, dalam menahan beban gempa, model kedua dan ketiga dapat menahan gempa yang lebih kuat.

Penelitian tentang desain tulangan pada hubungan *pile cap* dan tiang juga dilakukan Iekel dkk. (2018). Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk membandingkan berbagai variasi desain penghubung *pile cap* dan tiang untuk menahan gaya angkat (*uplift*). Jenis fondasi tiang yang digunakan adalah tiang baja profil H dengan variasi ukuran profil HP14×73, HP10×57, dan HP10×42. Penelitian ini menganalisis enam macam desain penghubung tiang ke *pile cap* dengan total 21 macam benda uji. 21 macam benda uji tersebut terdiri dari 6 buah benda uji dengan desain penghubung polos sedalam 12” dan 6 buah benda dengan desain penghubung polos sedalam 24”, 2 buah benda uji dengan desain penghubung *threaded rod*, 2 buah benda uji dengan desain penghubung sangkar, 2 buah benda uji dengan jenis penghubung *U-bar*, dan 2 macam benda uji dengan jenis penghubung *V-bar*. Penelitian dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium, dan pembebanan dilakukan dengan bantuan dua buah *actuator jack* kapasitas 200 kip. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa variasi ukuran tiang tidak memberikan dampak pada kapasitas ultimit penghubung tiang ke *pile cap*, keretakan beton pada jenis penghubung polos dengan panjang 12” membuat ikatan antara tiang baja dan beton menghilang. Kemudian hasil dari pengujian penghubung jenis *threaded rod* dan sangkar menunjukkan kapasitas ultimit yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis penghubung polos, sedangkan penghubung tipe *U-bar* dan *V-bar* menunjukkan kapasitas yang lebih tinggi daripada jenis penghubung lain. Selain itu, lubang hasil pengeboran pada profil tiang baja tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas hubungan tiang ke *pile*

cap, tetapi ukuran lubang dan letak penempatannya pada profil tiang baja perlu diperhitungkan untuk mencapai kapasitas tertinggi.

Penghubung tiang ke *pile cap* tidak hanya menggunakan tulangan baja, tetapi juga dapat menggunakan jenis baja penghubung lain seperti *perfobond*. Kim, dkk. (2016) melakukan penelitian untuk membandingkan kekuatan hubungan tiang ke *pile cap* dengan penghubung tulangan baja dan *perfobond* untuk menahan beban lateral. Fondasi tiang yang dianalisis adalah tiang baja dengan diameter 400 mm. Penelitian ini melakukan pengujian secara langsung di laboratorium dengan total tujuh benda uji yang terdiri dari satu benda uji dengan jenis penghubung tulangan baja, empat benda uji dengan jenis penghubung *perfobond* lubang tertutup dengan perbedaan masing-masing benda uji terdapat pada kedalaman pengisian beton pada tiang dan jumlah pelat baja *L-shaped*, dan dua benda uji dengan jenis penghubung *perfobond* lubang terbuka dengan perbedaan kedua benda uji terdapat pada kedalaman pengisian beton pada tiang. Hasil penelitian menunjukkan pola retakan pada setiap benda uji hampir sama, retak pertama kali terjadi pada sisi atas *pile cap* dengan arah tegak lurus beban lateral, kemudian merambat ke sisi samping *pile cap*. Ketika beban semakin meningkat, peremukan beton terjadi pada sisi tekannya. Pada benda uji dengan jenis penghubung *perfobond*, terdapat pola retakan berbentuk setengah lingkaran di atas *pile cap*, sedangkan pada benda uji dengan jenis penghubung tulangan baja tidak terdapat pola retakan tersebut. Jenis penghubung *perfobond* lubang terbuka memiliki kapasitas tahanan lentur yang lebih tinggi dibandingkan dengan *perfobond* lubang tertutup sebesar 10% - 20%. Selain itu, jenis penghubung *perfobond* lubang terbuka memiliki kapasitas tahanan lentur yang hampir sama dengan jenis penghubung tulangan baja. Untuk variasi jumlah pelat *L-shaped* tidak berdampak tinggi pada kapasitas tahanan lentur benda uji, dengan demikian pemasangan pelat *L-shaped* tidak diharuskan.

Penelitian yang berbeda tentang *perfobond* juga dilakukan Kim dkk. (2016a), penelitian ini dilakukan untuk menganalisis jenis *perfobond* yang paling efektif untuk menahan gaya cabut. Benda uji pada penelitian ini hanya menggunakan *perfobond* dan balok beton tanpa menggunakan tiang baja sebagai fondasi. Sepuluh macam variasi *perfobond* dengan perbedaan jenis lubang, dimensi lubang, dan kedalaman penanaman disiapkan. Pengujian dilakukan secara langsung di

laboratorium dengan bantuan *universal testing machine (UTM)* kapasitas 250 kN. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa *perfobond* dengan lubang lebih kuat hingga enam kali lipat dibandingkan dengan *perfobond* tanpa lubang dalam menahan gaya cabut. Kemudian penambahan kedalaman penanaman *perfobond* dapat meningkatkan kapasitas geser *perfobond* tersebut. Selain itu, *perfobond* dengan lubang terbuka memiliki kapasitas geser yang lebih tinggi dibandingkan dengan *perfobond* lubang tertutup.

Penelitian mengenai jenis penghubung *perfobond* juga dilakukan Rhim dkk. (2018). Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk menganalisis kekuatan penghubung jenis *perfobond* pada hubungan tiang baja ke *pile cap* untuk menahan gaya tekan aksial. Penelitian dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium dan permodelan pada *software* ABAQUS sebagai verifikasi hasil pengujian di laboratorium. Model pengujian yang disiapkan untuk penelitian ada enam macam yang terdiri dari, satu model dengan jenis hubungan polos (tanpa penghubung), satu model dengan jenis penghubung tulangan baja, dan empat model dengan jenis penghubung *perfobond* lubang tertutup dengan perbedaan masing-masing model terdapat pada kedalaman beton pengisi tiang baja dan jumlah pelat *L-shaped*. Pembebanan pada pengujian laboratorium menggunakan bantuan alat *universal testing machine (UTM)* dengan kapasitas 250 kN. Hasil dari penelitian menunjukkan pola retakan yang mirip pada semua benda uji, retakan dimulai dari bagian atas balok beton disekitar hubungan tiang baja, kemudian menyebar ke bagian sisi samping balok beton. Dari hasil pengujian juga ditunjukkan bahwa hubungan dengan jenis *perfobond* dapat meningkatkan kekakuan menjadi lebih tinggi. selain itu, penggunaan pelat *L-shaped* juga berguna untuk meningkatkan kapasitas beban puncak dan kekakuan benda uji, walaupun peningkatan lebih terlihat pada kekakuan benda uji. Kemudian hasil dari analisis menggunakan ABAQUS menunjukkan bahwa tipe penghubung dengan *perfobond* dapat menahan beban puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji tanpa *perfobond*.

Penelitian mengenai hubungan fondasi tiang dengan *pile cap* tidak hanya dilakukan untuk fondasi gedung saja, tetapi juga dilakukan untuk fondasi jembatan, seperti yang dilakukan oleh Kappes dkk. (2016). Penelitian dilakukan untuk menganalisis kekuatan tulangan penghubung tiang baja ke *pile cap* terhadap beban

seismik pada struktur bawah jembatan. Desain tulangan penghubung yang digunakan berbentuk *U-bar* yang diikat pada sisi samping kepala tiang. Enam macam desain dengan perbedaan jumlah tulangan *U-bar* dan kedalaman penanaman tiang diuji secara langsung di laboratorium. Beban yang diberikan pada benda uji berupa beban aksial sebesar 66,7 kN dan beban lateral dengan bantuan *actuator* kapasitas 445 kN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tulangan penghubung jenis *U-bar* yang dipasang pada posisi atas dan bawah kepala tiang mampu menahan momen yang lebih besar dibandingkan dengan tulangan penghubung yang hanya diletakan pada sisi bawah kepala tiang.

Perbedaan penelitian-penelitian tersebut dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan penulis sekarang diuraikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan dengan penelitian terdahulu tentang desain hubungan tiang dengan *pile cap*

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
1	<i>Seismic Performance of Prestressed High Strength Concrete Pile to Pile Cap Connections</i>	2014	Tiecheng Wang, Zhijian Yang, Hailong Zhao, dan Wenjin Wang	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>PHC pile</i> . 2. Penelitian dilakukan dengan uji laboratorium dan permodelan di ABAQUS. 3. Pembebanan dilakukan dari arah aksial dan lateral. 4. Variasi desain penghubung ada enam macam.	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>bored pile</i> . 2. Penelitian hanya dilakukan dengan permodelan di ABAQUS. 3. Pembebanan dilakukan hanya pada arah lateral. 4. Variasi desain penghubung ada lima macam.

Tabel 2.1 Lanjutan

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
				5. Dari enam model yang dianalisis, diameter, panjang, dan jumlah tulangan penghubung pada masing-masing model dibuat bervariasi.	5. Dari lima model yang dianalisis, diameter, panjang, dan jumlah tulangan penghubung pada masing-masing model hanya satu macam.
2	<i>Seismic Performance of Pile-Cap Connections of Prestressed High-Strength Concrete Pile with Different Detail</i>	2017	Zhaosheng Guo, Wubin He, Xiaohong Bai, dan Y. Frank Chen.	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>PHC pile</i> . 2. Penelitian dilakukan dengan uji laboratorium dan permodelan di ABAQUS. 3. Variasi desain penghubung ada enam macam. 4. Variasi desain penghubung ada enam macam.	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>bored pile</i> . 2. Penelitian hanya dilakukan dengan permodelan di ABAQUS. 3. Pembebanan dilakukan hanya pada arah lateral. 4. Variasi desain penghubung ada lima macam.
3	<i>Performance Investigation and Design of Pile-to-Pile Cap Connections Subject to Uplift</i>	2018	Philip P. Iekel, Brent Phares, dan Michael Nop	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah tiang baja profil H. 2. Penelitian dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium.	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>bored pile</i> . 2. Penelitian dilakukan dengan <i>software</i> ABAQUS.

Tabel 2.1 Lanjutan

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
				3. Variasi desain penghubung ada enam macam.	3. Variasi desain penghubung ada lima macam.
				4. Pembebanan diasumsikan sebagai gaya angkat (<i>uplift</i>).	4. Pembebanan diasumsikan sebagai gaya geser dasar (arah lateral).
				5. Dimensi fondasi tiang ada tiga macam.	5. Dimensi fondasi tiang hanya satu macam.
4	<i>Structural Performance of Steel Pile Caps Strengthened with Perfobond Shear Connectors under Lateral Loading</i>	2016	Young-Ho Kim, Jae-Yoon Kang, Sang-Ho Kim, dan Dae-Jin Kim	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah tiang baja berbentuk pipa. 2. Penelitian dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium. 3. Jenis penghubung yang diteliti adalah tulangan baja dan <i>perfbond</i> . 4. Variasi desain penghubung ada tujuh macam. 5. Pembebanan diberikan pada arah lateral dan aksial.	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>bored pile</i> . 2. Penelitian dilakukan dengan permodelan di <i>software</i> ABAQUS. 3. Jenis penghubung yang diteliti adalah tulangan baja. 4. Variasi desain penghubung ada lima macam. 5. Pembebanan diberikan hanya pada arah lateral.

Tabel 2.1 Lanjutan

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
5	<i>Pull-Out Resistance Capacity of a New Perfobond Shear Connector for Steel Pile Cap Strengthening</i>	2016	Young-Ho Kim, Jae-Yoon Kang, Hyun-Bon Koo, dan Dae-Jin Kim	<p>1. Jenis tulangan penghubung yang digunakan adalah <i>perfobond</i>.</p> <p>2. Pengujian dilakukan secara langsung di laboratorium.</p> <p>3. Hanya memodelkan <i>perfobond</i> dan balok beton saja.</p> <p>4. Variasi desain tulangan penghubung ada sepuluh macam.</p> <p>5. Pembebanan diberikan sebagai gaya cabut pada arah aksial.</p>	<p>1. Jenis tulangan penghubung yang digunakan adalah tulangan baja.</p> <p>2. Pengujian dilakukan dengan <i>software</i> ABAQUS CAE.</p> <p>3. Semua bagian dimodelkan dalam analisis.</p> <p>4. Variasi desain tulangan penghubung ada lima macam.</p> <p>5. Pembebanan diberikan sebagai gaya geser dasar pada arah lateral.</p>
6	<i>Push-out Test and Analysis of Steel Pile Caps Strengthened with Perfobond Shear Connectors</i>	2018	Hong Chul Rhim, Jae-Yoon Kang, Young Ho Kim, dan Dae-Jin Kim	<p>1. Jenis fondasi yang diteliti adalah tiang baja berbentuk pipa.</p> <p>2. Penelitian dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium dan permodelan di <i>software</i> ABAQUS.</p>	<p>1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>bored pile</i>.</p> <p>2. Penelitian hanya dilakukan dengan permodelan di <i>software</i> ABAQUS.</p>

Tabel 2.1 Lanjutan

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
				3. Jenis penghubung yang diteliti adalah tulangan baja dan <i>perfbond</i> .	3. Jenis penghubung yang diteliti adalah tulangan baja.
				4. Variasi desain penghubung ada enam macam.	4. Variasi desain penghubung ada lima macam.
				5. Pembebanan diberikan pada arah aksial.	5. Pembebanan diberikan pada arah lateral.
7	<i>Seismic Performance of Concrete-Filled Steel Tube to Concrete Pile-Cap Connections</i>	2016	Lenci Kappes, Michael Berry, Flynn Murray, Jerry Stephens, dan Kent Barnes	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah tiang baja berbentuk pipa. 2. Penelitian dilakukan dengan pengujian langsung di laboratorium.	1. Jenis fondasi yang diteliti adalah <i>bored pile</i> . 2. Penelitian dilakukan dengan permodelan di <i>software</i> ABAQUS.
				3. Variasi desain penghubung ada enam macam.	3. Variasi desain penghubung ada lima macam.
				4. Pembebanan diberikan pada arah aksial dan lateral.	4. Pembebanan hanya diberikan pada arah lateral.

2.2.2. Penelitian terdahulu tentang fondasi tiang terhadap beban lateral

Perilaku dan kekuatan fondasi tiang saat menerima beban lateral berbeda-beda, hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal seperti jumlah kelompok tiang dan jenis fondasi tiang yang digunakan, seperti penelitian yang dilakukan oleh Abbas dkk. (2016). Penelitian tersebut dilakukan untuk menganalisis seberapa efisien kekuatan kelompok tiang (2×2) dibandingkan dengan tiang tunggal dalam menahan beban lateral. Analisis metode elemen hingga dilakukan menggunakan bantuan aplikasi ABAQUS. Penelitian dimulai dengan membandingkan dua desain kepala tiang tunggal, yaitu dengan desain kepala bebas (*free head*) dan kepala terikat (*fixed head*), dari hasil perbandingan didapatkan desain dengan kepala terikat (*fixed head*) lebih kuat dibandingkan dengan desain kepala bebas (*free head*). Desain tiang tunggal dengan kepala terikat (*fixed head*) tersebut kemudian dibandingkan dengan kelompok tiang (2×2) dengan variasi spasi tiang 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, dan 7D untuk mengetahui seberapa besar efisiensi kelompok tiang dibandingkan dengan tiang tunggal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelompok tiang dengan spasi 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, dan 7D memiliki efisiensi berturut-turut sebesar 45%, 57%, 65%, 74%, 83%, dan 97%.

Perbandingan antara tiang tunggal dengan kelompok tiang dalam menahan beban lateral juga diteliti oleh Xu dan Ma (2017). Penelitian dilakukan dengan pengujian tiang tunggal secara langsung di lapangan dan permodelan kelompok tiang dengan *software* ANSYS. Tiang tunggal yang diuji adalah tiang pancang dengan ujung bebas yang diuji secara langsung di lapangan dengan bantuan *lifting jack*, sedangkan kelompok tiang yang diuji dengan *software* ANSYS terdiri dari kelompok 2 tiang, 4 tiang, dan 9 tiang. Hasil penelitian menunjukkan, *bending moment* pada kepala tiang dengan ujung bebas adalah nol, sedangkan pada kepala tiang yang terikat adalah yang paling besar. Pada permodelan kelompok tiang, *bending moment* yang terjadi pada kepala tiang lebih besar dari pada yang terjadi pada badan tiang. *Bending moment* pada badan tiang dapat dikurangi dengan menambahkan tulangan pada tiang. Sedangkan efek *bending moment* yang terjadi pada kepala tiang dapat dikurangi dengan perkuatan seperti penambahan tulangan pada hubungan tiang ke *pile cap*.

Penelitian mengenai perbandingan tiang tunggal dengan kelompok tiang juga dilakukan oleh Hsueh dkk. (2018). Penelitian dilakukan untuk menganalisis karakteristik dan perilaku kelompok tiang saat menerima beban lateral. Kelompok tiang yang dianalisis terdiri dari 6 tiang dengan *bored pile* diameter 1500 mm sedalam 34,9 m, dan tiang tunggal kepala bebas dengan dimensi dan kedalaman yang sama. Analisis masing-masing model dilakukan dengan *software* ABAQUS. Hasil penelitian menunjukkan tiang tunggal dengan kepala bebas mengalami retak saat menerima beban sebesar 630 kN dengan defleksi 10,1 mm. Selain itu, pada tiang tunggal dengan kepala bebas, tegangan maksimum terjadi pada kedalaman 7 meter, sedangkan pada kelompok tiang tegangan maksimum terjadi pada kedalaman 1,25 m, dan tegangan terbesar kedua pada kedalaman 9 m. Hal tersebut menjelaskan kenapa area tanah yang terusik pada kelompok tiang lebih dalam daripada tiang tunggal dengan kepala bebas. Kemudian, barisan depan dan tengah pada kelompok tiang menahan beban terbesar dibandingkan dengan barisan belakang. Penambahan beban pada model juga meningkatkan beban yang diterima oleh barisan tiang depan dan tengah, namun pada barisan belakang beban yang diterima mengalami penurunan.

Perbedaan penelitian-penelitian tersebut dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan penulis sekarang diuraikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan dengan penelitian terdahulu tentang fondasi tiang terhadap beban lateral

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
1	<i>Analysis of Laterally Loaded (2×2) square Pile groups Using Finite Element Methode</i>	2014	Sarmad Abdullah Abbas, Wisam Al-Rekabi, dan Ali Hasan Al-Aboodi	1. Membandingkan efesiensi kelompok tiang (2×2) dengan tiang tunggal terhadap beban lateral.	1. Membandingkan variasi desain tulangan penghubung untuk menahan beban lateral.

Tabel 2.2 Lanjutan

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
				2. Permodelan terdiri dari tiga variasi kedalaman tiang, yaitu 1,5 m, 3 m, dan 4,5 m dengan variasi spasi tiang 2D-7D.	2. Permodelan menggunakan kedalaman tiang 1 m untuk semua variasi desain.
				3. Jenis fondasi yang dianalisis adalah tiang baja.	3. Jenis fondasi yang dianalisis adalah <i>bored pile</i> .
				4. Tanah dimodelkan dalam permodelan di ABAQUS.	4. Tanah tidak dimodelkan dalam permodelan di ABAQUS.
2	<i>Study on Bearing Capacity of Prestressed Pipe Pile Foundation Under Horizontal Load</i>	2017	Jin Xu, Lin Ma	1. Membandingkan kapasitas tiang tunggal dan kelompok tiang dengan 2 tiang, 4 tiang, dan 9 tiang terhadap beban lateral.	1. Membandingkan variasi desain tulangan penghubung untuk menahan beban lateral.
				2. Jenis fondasi yang dianalisis adalah tiang pancang.	2. Jenis fondasi yang dianalisis adalah <i>bored pile</i> .
				3. Pengujian dilakukan secara langsung di lapangan dan dengan permodelan di ANSYS.	3. Penelitian hanya dilakukan dengan permodelan di ABAQUS CAE.

Tabel 2.2 Lanjutan

No.	Judul Penelitian Terdahulu	Tahun	Penulis	Perbedaan	
				Terdahulu	Sekarang
3	<i>Finite Element Analysis to Characterize the Lateral Behaviour of a Capped Pile Group</i>	2018	Chao-Kuang Hsueh, San-Shyan Lin, Dominic E. L. Ong	1. Menganalisis perilaku kelompok tiang terhadap beban lateral. 2. Jenis fondasi yang dianalisis adalah <i>bored pile</i> diameter 1500 mm. 3. Tanah dimodelkan dalam permodelan di ABAQUS.	1. Membandingkan variasi desain tulangan penghubung untuk menahan beban lateral. 2. Jenis fondasi yang dianalisis adalah <i>bored pile</i> diameter 600 mm. 3. Tanah tidak dimodelkan dalam permodelan di ABAQUS.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. ABAQUS CAE 6.14

ABAQUS CAE (*Complete Abaqus Environment*) adalah *software* ABAQUS versi lengkap yang dapat digunakan untuk membuat, memasukan, meninjau, dan mengevaluasi hasil dari simulasi ABAQUS *Standard* dan ABAQUS *Explicit*. ABAQUS CAE dibagi dalam beberapa modul, dimana masing-masing modul mendefinisikan sebuah aspek dalam proses pembuatan model, seperti mendefinisikan geometri, material, dan membuat *mesh* (ABAQUS 6.14 *User's Guide*).

Dasar analisis dari *software* ABAQUS CAE adalah menggunakan metode elemen hingga, oleh karena itu *software* ini sering digunakan untuk berbagai analisis yang memerlukan hasil detail mengenai sebuah material atau benda yang dimodelkan. Berbagai material yang dapat disimulasikan pada ABAQUS antara lain seperti beton, logam, karet, tanah, batuan, hingga beton bertulang. Selain material yang bervariasi, ABAQUS juga dapat melakukan simulasi untuk benda-

benda dengan bentuk non linier, sehingga permodelan yang dilakukan tidak terbatas pada bentuk benda uji.

2.2.2. *Pile cap*

Pile cap adalah elemen fondasi dalam yang menggabungkan fondasi tiang, dan juga termasuk balok pengikat dan rakit fondasi (SNI 1726:2012 Pasal 3.36). *Pile cap* berfungsi untuk mengikat tiang-tiang menjadi satu kesatuan dan memindahkan beban kolom kepada tiang (Pamungkas dan Harianti, 2013). Penyusunan tiang pada *pile cap* sebaiknya secara simetris untuk mengurangi tegangan pada *pile cap* yang terlalu besar. Apabila *pile cap* menerima beban aksial sentris, maka tiang-tiang di dalam kelompoknya menerima beban dengan besar yang sama (Hardiyatmo, 2008). Namun apabila beban yang diterima tidak sentris atau sentris tapi terdapat momen, maka beban yang diterima tiang-tiang pada kelompoknya tidak sama, dan dalam perencanaan menurut Hardiyatmo (2008) harus dibuat anggapan sebagai berikut ini.

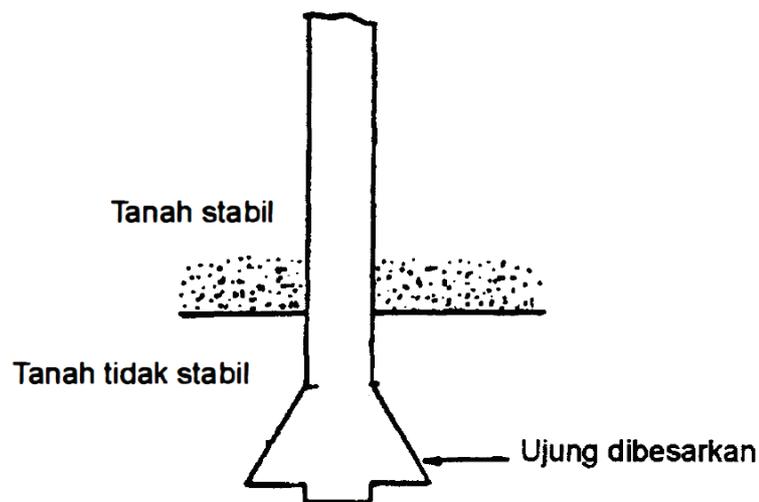
- a. *Pile cap* cukup kaku.
- b. Ujung atas tiang dianggap menggantung pada *pile cap*, sehingga tidak ada momen lentur yang diakibatkan oleh *pile cap* ke tiang.
- c. Tiang merupakan kolom pendek dan elastis, sehingga distribusi tegangan dan deformasi membentuk bidang rata.

2.2.3. Fondasi *bored pile*

Menurut Pamungkas dan Harianti (2013), fondasi adalah struktur bagian paling bawah dari suatu konstruksi (gedung, jembatan, jalan raya, terowongan, dinding penahan tanah, menara, tanggul, dll.) yang berfungsi untuk menyalurkan beban vertikal di atasnya (kolom) maupun beban horizontal ke tanah. Sedangkan fondasi tiang merupakan elemen fondasi dalam, termasuk fondasi *bored pile*, tiang pancang, dan tiang tekan (SNI 1726:2012 Pasal 3.14). Menurut Hardiyatmo (2008), fondasi *bored pile* adalah fondasi yang dipasang ke dalam tanah dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu, kemudian diisi dengan tulangan dan dicor beton.

Fondasi *bored pile* biasanya digunakan pada proyek yang berada di lingkungan padat penduduk untuk mengurangi getaran dan kebisingan saat

pelaksanaan pekerjaan fondasi. Menurut Hardiyatmo (2008), fondasi ini umumnya dipakai pada tanah yang stabil dan kaku, sehingga memungkinkan untuk membentuk lubang yang stabil dengan alat bor, namun apabila tanah mengandung air, dibutuhkan pipa besi untuk menahan dinding lubang, pipa besi ini kemudian ditarik ke atas pada waktu pengecoran. Pada tanah keras atau batuan lunak, dasar tiang dapat dibesarkan untuk menambah tahanan dukung ujung tiang, seperti yang digambarkan Hardiyatmo (2008) pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bagian bawah *bored pile* yang dibesarkan (Hardiyatmo, 2008).

Kelebihan dan kekurangan yang didapatkan dalam penggunaan *bored pile* sebagai fondasi bangunan menurut Hardiyatmo (2008) antara lain sebagai berikut ini.

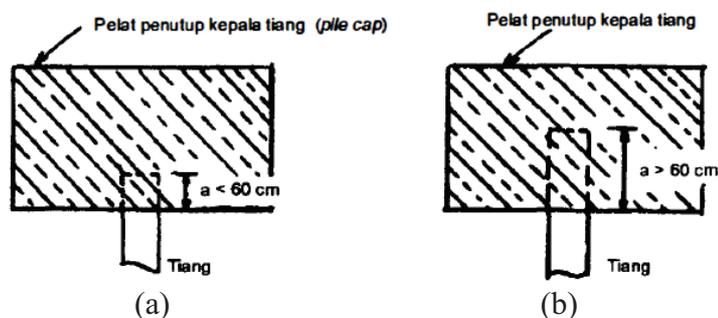
- a. Kelebihan penggunaan *bored pile* antara lain sebagai berikut ini.
 - 1) Resiko kenaikan muka tanah tidak ada.
 - 2) Kedalaman *bored pile* dapat divariasikan.
 - 3) Dapat melakukan pemeriksaan tanah dan dicocokkan dengan data laboratorium.
 - 4) *Bored pile* dapat dipasang sampai cukup dalam dan dengan diameter yang besar, serta bagian ujungnya dapat dibesarkan jika pada bagian dasar berupa lempung atau batu lunak.
 - 5) Tulangan tidak terpengaruh oleh tegangan saat proses pengangkutan dan pemancangan.

- b. Kekurangan penggunaan *bored pile* antara lain sebagai berikut ini.
- 1) Proses pengeboran dapat mengakibatkan gangguan kepadatan pada tanah yang berupa pasir atau kerikil kecil.
 - 2) Mutu beton tidak dapat dikontrol dengan baik apabila dipengaruhi oleh air tanah.
 - 3) Kapasitas dukung tanah terhadap *bored pile* dapat berkurang akibat air yang mengalir ke dalam lubang bor.
 - 4) Pada tanah pasir, ujung bawah *bored pile* tidak dapat dilakukan pembesaran.

2.2.4. Tulangan penghubung

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). Tulangan penghubung merupakan tulangan utama *bored pile* yang dibuat menerus masuk ke dalam *pile cap* dengan panjang umum yang digunakan sebesar $40D$ atau 40 kali diameter sesuai dengan persyaratan PBI N.I. 1971 Pasal 18.12.2.b.

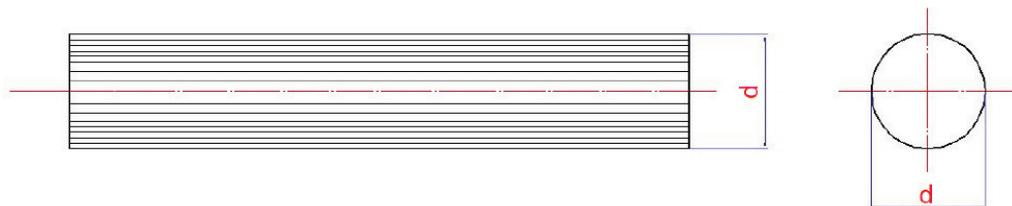
Menurut Pamungkas dan Harianti (2013), dalam analisis gaya horisontal (lateral), tiang perlu dibedakan menjadi dua menurut ikatannya dengan *pile cap*, yaitu tiang ujung jepit dan tiang ujung bebas. Tiang ujung jepit didefinisikan sebagai tiang yang ujung atasnya terjepit (tertanam) pada *pile cap* paling sedikit sedalam 60 cm, dan tiang yang bagian atasnya terjepit kurang dari 60 cm termasuk tiang ujung bebas (McNulty dalam Pamungkas dan Harianti, 2013). Perbedaan tiang ujung jepit dengan tiang ujung bebas ditunjukkan pada Gambar 2.2.



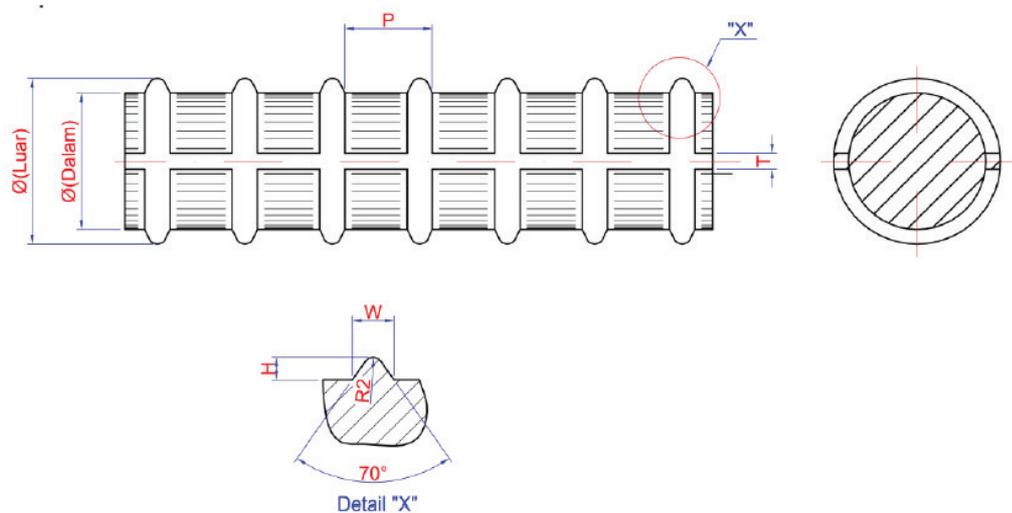
Gambar 2.2 Bentuk tiang ujung bebas (a) dan tiang ujung jepit (b) (Hardiyatmo, 2008).

2.2.5. Baja tulangan

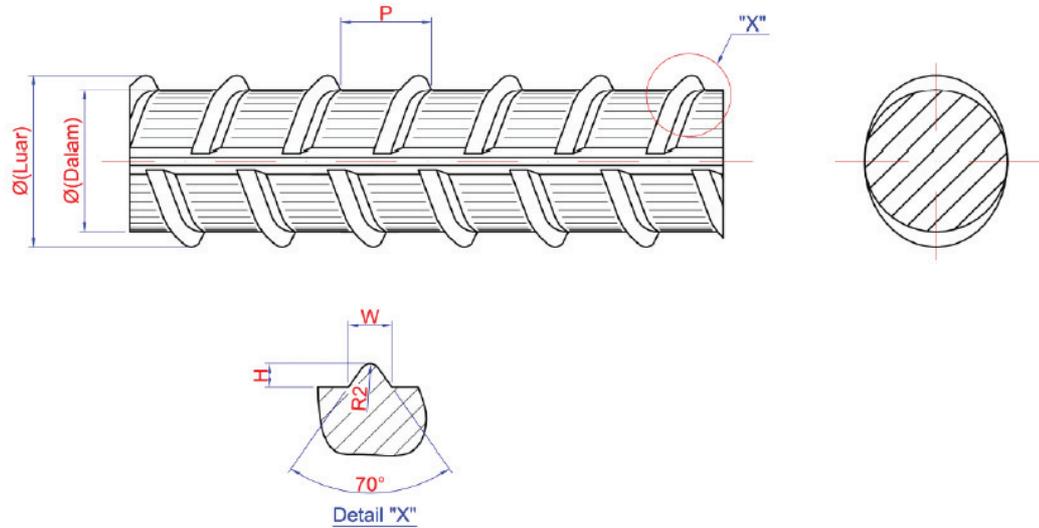
Baja tulangan merupakan baja karbon atau baja paduan yang berbentuk batang berpenampang bundar dengan permukaan polos atau sirip/ulir dan digunakan untuk penulangan beton, yang diproduksi dari bahan baku *billet* dengan cara canai panas (SNI 2052:2017 Pasal 3.1). Baja tulangan terbagi menjadi dua macam, yaitu baja tulangan beton polos (BjTP) dan baja tulangan beton sirip (BjTS). Menurut SNI 2052:2017 Pasal 4.1 dan 4.2, baja tulangan beton polos (BjTP) adalah tulangan beton berpenampang bundar dengan permukaan rata tidak bersirip/berulir, sedangkan baja tulangan beton sirip/ulir (BjTS) adalah baja tulangan beton yang permukaannya memiliki sirip/ulir melintang dan memanjang yang dimaksudkan untuk meningkatkan daya lekat dan guna menahan gerakan membujur dari batang secara relatif terhadap beton. Bentuk penampang baja tulangan beton polos dan baja tulangan beton bersirip/ulir ditunjukkan pada Gambar 2.3 sampai Gambar 2.6.



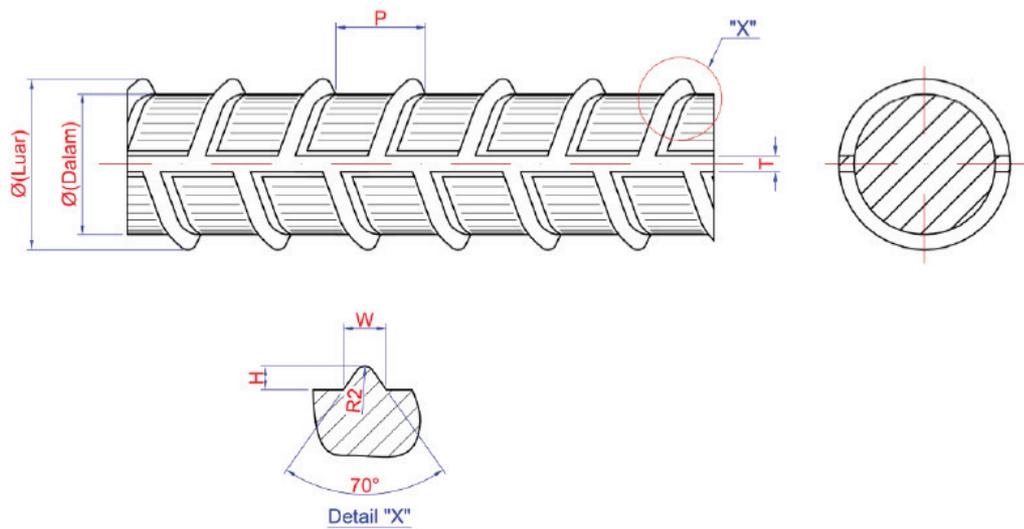
Gambar 2.3 Baja tulangan beton polos (SNI 2052:2017 Pasal 6.3.2).



Gambar 2.4 Baja tulangan beton sirip/ulir bambu (SNI 2052:2017 Pasal 6.3.2).



Gambar 2.5 Baja tulangan beton sirip/ulir curam (SNI 2052:2017 Pasal 6.3.2).



Gambar 2.6 Baja tulangan beton sirip/ulir tulang ikan (SNI 2052:2017 Pasal 6.3.2).

Dalam perancangan, tegangan leleh tulangan baja perlu diketahui untuk mendapatkan kapasitas tulangan tersebut. Tegangan leleh adalah istilah generik yang menunjukkan titik leleh atau kekuatan leleh tulangan (SNI 1729:2015). Saat tegangan leleh tercapai maka tulangan tersebut akan mengalami leleh. Leleh adalah keadaan batas dari deformasi inelastis yang terjadi sesudah tegangan leleh tercapai, sedangkan tegangan adalah gaya per satuan luas luas yang disebabkan oleh gaya aksial, momen, geser, atau torsi (SNI 1729:2015).

2.2.6. Beton

Menurut SNI 2847:2013 Pasal 2.2, beton merupakan campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Sedangkan beton bertulang menurut SNI 2847:2013 Pasal 2.2, adalah beton struktural yang ditulangi dengan tidak kurang dari jumlah baja prategang atau tulangan non-prategang minimum yang ditetapkan.

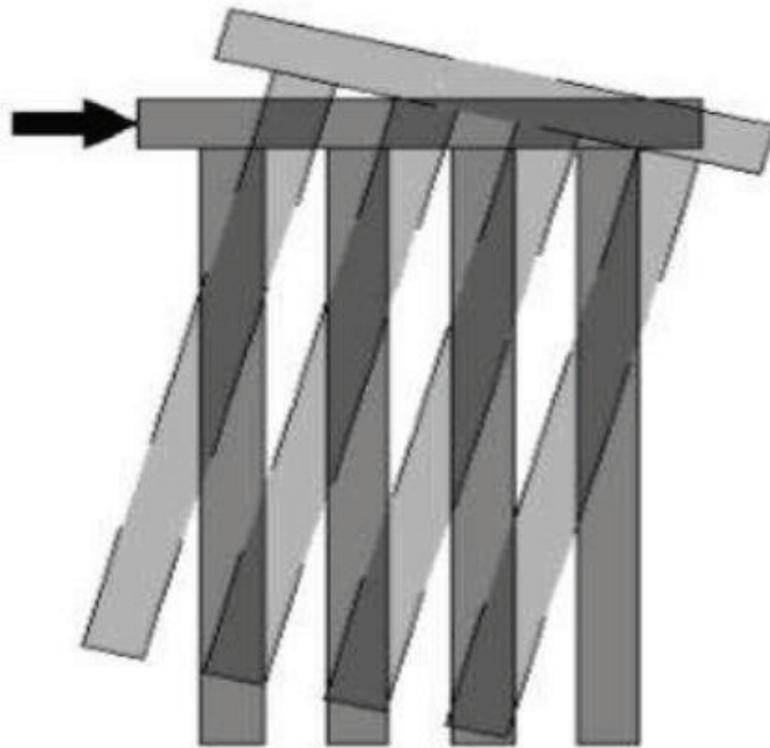
Beton diklasifikasikan menjadi beberapa macam berdasarkan berat, dan mutunya. Beton berdasarkan beratnya diklasifikasikan menjadi beton ringan dan beton normal. Menurut SNI 2847:2013 Pasal 2.2, beton termasuk dalam kategori beton ringan apabila memiliki berat volume antara 1140 sampai 1840 kg/m³. Sedangkan beton normal menurut Pd T-07-2005-B, adalah beton dengan berat volume antara 2200 sampai 2500 kg/m³. Klasifikasi beton berdasarkan mutunya menurut Pd T-07-2005-B diuraikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Mutu beton dan penggunaan (*Pd T-07-2005-B, Pasal 4.1, Tabel 1.*)

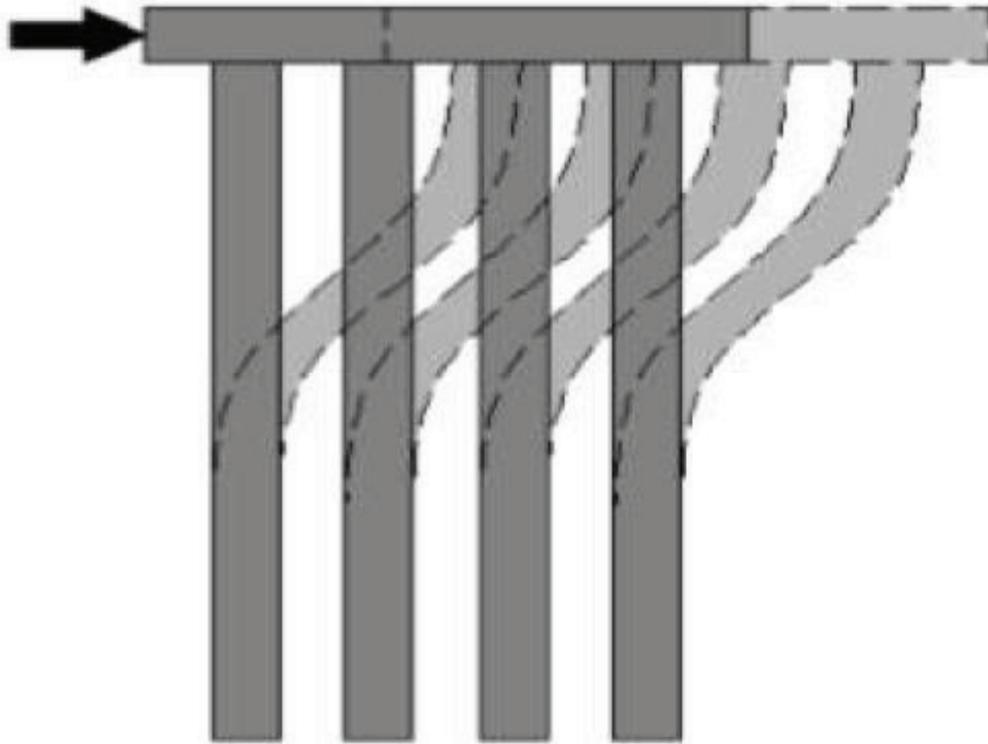
Jenis Beton	f_c' (MPa)	σ_{bk}' (kg/m ²)	Penggunaan
Mutu Tinggi	35 - 65	K400 – K500	Umumnya digunakan untuk beton prategang seperti tiang pancang beton prategang, pelat beton prategang, dan sejenisnya.
Mutu Sedang	20 - <35	K250 - <K400	Umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma, kerb, beton pracetak, gorong-gorong beton bertulang, bangunan bawah jembatan.
Mutu Rendah	15 - <20	K175 - <K250	Umumnya digunakan untuk struktur beton tanpa tulangan seperti beton siklop, trotoar dan pasangan batu kosong yang diisi adukan, pasangan batu.
	10 - <15	K125 - <K175	Digunakan sebagai lantai kerja, penimbunan kembali dengan beton.

2.2.7. Gaya geser dasar

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). Gerakan rotasi dan translasi digambarkan Reese dan Matlock (dalam Hanifah, 2018) seperti pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Gerakan rotasi pada kelompok tiang (*Reese dan Matlock dalam Hanifah, 2018*).



Gambar 2.8 Gerakan translasi pada kelompok tiang (*Reese dan Matlock dalam Hanifah, 2018*).

Besarnya gaya geser yang bekerja pada sebuah bangunan bergantung pada beberapa hal, seperti lokasi, tipe, dan dimensi bangunan. Salah satu contoh dari hasil penelitian Afriandini dan Saputro (2018), besarnya gaya geser dasar dari hasil perhitungan struktur gedung 7 lantai dengan acuan SNI 1726:2012 didapatkan gaya geser dasar yang berbeda-beda untuk setiap kota, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Gaya geser dasar (*Afriandini dan Saputro, 2018*)

Kota	Gaya Geser Dasar (kN)
Banten	5319,76
Jakarta	4924,08
Bandung	6814,57
Semarang	5627,52
Yogyakarta	6374,92
Surabaya	4352,53