

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jalan Tol *Trans-Sumatera* adalah jaringan jalan tol sepanjang 2.818 km di Indonesia yang direncanakan menghubungkan kota-kota di pulau Sumatera, dari Lampung hingga Aceh. Jalan Tol Binjai – Stabat merupakan proyek pelaksanaan pembangunan jalan tol ruas Binjai – Langsa, seksi Binjai - Pangkalan Brandan sepanjang 12,5 km dengan 3 buah simpang susun, dimana pembangunan tersebut merupakan investasi dari PT. Hutama Karya (Persero) melalui kontraktor yaitu PT. Hutama Karya Infrastruktur sebagai pelaksana yang merupakan anak perusahaan PT. Hutama Karya (Persero).

Pembangunan infrastruktur seperti Jalan Tol sangat membutuhkan suatu bangunan yang kokoh dengan fondasi yang kuat. Salah satu infrastruktur Jalan Tol adalah jembatan *underpass* yang bertujuan memperbaiki elevasi permukaan jalan, sehingga didapatkan permukaan jalan yang rata untuk memberikan kenyamanan dan aman bagi pengendara, jembatan *underpass* membutuhkan fondasi bangunan yang kuat dan kokoh untuk memikul seluruh beban bangunan dan meneruskannya ke dalam tanah sampai ke lapangan atau ke dalaman tertentu.

Pembangunan Jalan Tol Binjai-Stabat memiliki beberapa *underpass* salah satunya *underpass* STA 2+550. Bangunan ini menggunakan fondasi tiang pancang beton pracetak pada ABT-A1 dan ABT-A2. Fondasi tiang pancang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Fondasi tiang pancang berfungsi untuk memindahkan atau mentransferkan beban-beban yang berada di atasnya (*super structure*) ke lapisan tanah yang lebih dalam (Pratama, et al., 2016). Kapasitas tiang pancang dihitung menggunakan data Kalendering, data pengujian Kalendering diambil dari pada saat pelaksanaan pemancangan. Pengambilan data kalendering dilakukan pada saat tiang mencapai tanah keras, besarnya penetrasi dan *rebound* diambil untuk 10 kali pukulan (Lukman, 2017).

Analisis dilakukan dengan beberapa persamaan dari rumus dinamik karena beberapa persamaan ini memiliki keakuratan dalam menganalisis kapasitas tiang pancang tunggal (Q_a) dengan data kalendering, adapun persamaan-persamaan yang akan dilakukan yaitu metode persamaan *Hiley* (1930), persamaan *Sanders* (1851), persamaan *Navy-Mckay* dan persamaan *Janbu* (1953), dari hasil perhitungan kapasitas tiang pancang tunggal ($Q_{rata-rata}$) dihubungkan dengan penetrasi tiang (s). Untuk analisis kapasitas tiang kelompok menggunakan faktor efisiensi tiang dengan metode *Converse-Labarre Formula*.

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu dan penting untuk menganalisis kapasitas tiang tunggal (Q_a), kapasitas tiang kelompok (Q_g) dan hubungan kapasitas tiang pancang ($Q_{rata-rata}$) dengan penetrasi tiang (s) berdasarkan data kalendering, selain itu tulisan ini akan membandingkan metode persamaan yang satu dengan yang lainnya untuk dapat menentukan kapasitas tiang dan pemilihan metode yang tepat.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, maka diambil beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Peningkatan pelayanan transportasi yang aman dan nyaman membutuhkan suatu bangunan yang kokoh dengan fondasi yang kuat.
2. Pembangunan jalan tol dalam kondisi tertentu memerlukan perencanaan jembatan dengan konstruksi pondasi yang kokoh.
3. Kondisi tanah dan kedalaman tanah keras menjadi pertimbangan dalam perencanaan fondasi dalam.
4. Perencanaan fondasi perlu pengetahuan kapasitas tiang sebagai dasar pertimbangan seberapa banyak tiang yang mampu memikul beban konstruksi di atasnya.
5. Kapasitas tiang dapat diketahui apabila data-data yang memadai untuk mendapatkan nilai kapasitas tiang tunggal.
6. Analisis kapasitas tiang pancang perlu perbandingan dari berbagai metode yang ada untuk memberikan hasil yang optimal.

7. Penilaian dari hasil analisis dari berbagai metode yang digunakan perlu dilihat kesamaan dan perbedaan hasil yang didapatkan.
8. Banyak parameter yang perlu diperhatikan untuk mendapatkan perencanaan tiang pancang yang teliti dan valid.
9. Kemampuan satu kelompok tiang perlu diketahui untuk mengetahui keamanan tiang dalam memikul beban yang ada.

1.3. Batasan Masalah

Beberapa batasan-batasan permasalahan dalam penulisan skripsi ini adalah:

1. Kapasitas tiang pada tiang pancang hanya ditentukan berdasarkan data kalendering.
2. Analisis kapasitas tiang tunggal hanya menggunakan metode persamaan *Hiley* (1930), persamaan *Sanders* (1851), persamaan *Navy-Mckay* dan persamaan *Janbu* (1953).
3. Hubungan kapasitas tiang dengan penetrasi tiang berdasarkan titik pemancangan.
4. Analisis kapasitas kelompok tiang hanya berdasarkan faktor efisiensi.
5. Analisis kapasitas kelompok tiang hanya menggunakan metode *Converse-Labarre Formula*.
6. Analisis kapasitas kelompok tiang berdasarkan hasil kapasitas tiang tunggal (Q_{total}) dari metode persamaan *Hiley* (1930), persamaan *Sanders* (1851), persamaan *Navy-Mckay*, dan persamaan *Janbu* (1953).
7. Analisis kapasitas tiang dilakukan pada ABT-A1 dan ABT-A2 pada *underpass* di Jalan Inspeksi dan Gas, Paya Bakung, Kecamatan Hamparan Perak, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20375.

1.4. Tujuan Penulisan

Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah:

1. Mengetahui kapasitas tiang tunggal (Q_a) berdasarkan data kalendering.
2. Mengetahui hubungan kapasitas tiang tunggal (Q_a) dengan penetrasi tiang (s).

3. Mengetahui kapasitas kelompok tiang (Q_g) berdasarkan efisiensi tiang.
4. Mengetahui perbandingan analisis kapasitas tiang tunggal dari metode yang digunakan.

1.5. Manfaat Penulisan

Manfaat penulisan skripsi ini, antara lain:

1. Menjadi acuan dalam menganalisis kapasitas tiang berdasarkan data kalendering.
2. Sebagai referensi dalam pelaksanaan tiang pancang di lapangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian dan Jenis-jenis Fondasi Tiang Pancang

Tiang pancang adalah bagian-bagian konstruksi yang dibuat dari kayu, beton, dan baja, yang digunakan untuk mentransmisikan benda-benda permukaan ke tingkat-tingkat permukaan yang lebih rendah dalam massa tanah (Bowles, 1984).

Tiang pancang umumnya digunakan antara lain:

1. Untuk membawa beban-beban konstruksi di atas tanah, ke dalam atau melalui sebuah lapisan tanah.
2. Untuk menahan gaya desakan ke atas, atau gaya guling seperti untuk telapak ruangan bawah tanah di bawah bidang batas air jenuh atau untuk menopang kaki-kaki menara terhadap guling.
3. Memampatkan endapan tak berkoheesi yang bebas lepas melalui kombinasi perpindahan isi tiang pancang dan getaran dorongan.
4. Mengontrol penurunan bila kaki-kaki yang tersebar atau telapak berada pada tanah tepi atau didasari oleh sebuah lapisan yang kemampatannya tinggi.
5. Membuat tanah di bawah pondasi mesin menjadi kaku untuk mengontrol amplitudo getaran dan frekuensi alamiah dari sistem tersebut.
6. Sebagai faktor keamanan tambahan di bawah tumpuan jembatan dan tiang, khususnya jika erosi merupakan persoalan yang potensial.
7. Untuk konstruksi lepas pantai untuk meneruskan beban-beban di atas permukaan air dan ke dalam tanah yang mendasari air tersebut.

Fondasi tiang pancang adalah fondasi dalam yang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Fondasi tiang pancang berfungsi untuk memindahkan atau mentransferkan beban-beban yang berada di atasnya (*super structure*) ke lapisan tanah yang lebih dalam (Pratama, et al., 2016).

Menurut Hardiyatmo (2015), menyatakan bahwa fondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Fondasi

tiang juga digunakan untuk bangunan yang menahan gaya angkat ke atas, terutama pada bangunan-bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya penggulingan akibat beban angin. Selain itu, tiang-tiang juga digunakan untuk mendukung bangunan dermaga, di mana pada bangunan ini, tiang-tiang dipengaruhi oleh gaya-gaya benturan kapal dan gelombang air.

Fondasi tiang digunakan untuk beberapa maksud, antara lain:

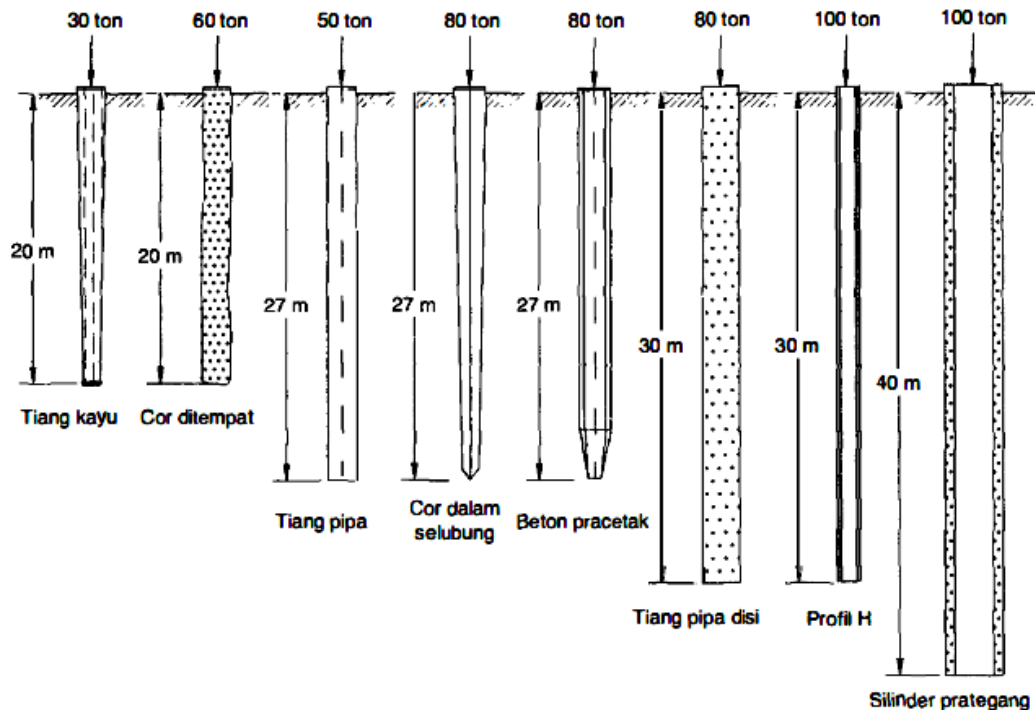
1. Untuk meneruskan beban bangunan yang terletak di atas air atau tanah lunak, ke tanah pendukung yang kuat.
2. Untuk meneruskan beban tanah yang relatif lunak sampai kedalaman tertentu sehingga fondasi bangunan mampu memberikan dukungan yang cukup untuk mendukung beban tersebut oleh gesekan sisi tiang dengan tanah sekitarnya.
3. Untuk mengangker bangunan yang dipengaruhi oleh gaya angkat ke atas akibat tekanan hidrostatik atau momen penggulingan.
4. Untuk menahan gaya-gaya horizontal dan gaya yang arahnya miring.
5. Untuk memadatkan tanah pasir, sehingga kapasitas dukung tanah tersebut bertambah.
6. Untuk mendukung fondasi bangunan yang permukaan tanahnya mudah tergerus air.

Fondasi tiang dapat dibagi menjadi 3 kategori, sebagai berikut:

1. Tiang perpindahan besar (*large displacement pile*), yaitu tiang pejal atau berlubang dengan ujung tertutup yang dipancang ke dalam tanah sehingga volume tanah yang relatif besar. Termasuk dalam tiang perpindahan besar adalah tiang kayu, tiang beton pejal, tiang beton prategang (pejal atau berlubang), tiang baja bulat (tertutup pada ujungnya).
2. Tiang perpindahan kecil (*small displacement pile*) adalah sama seperti tiang kategori pertama, hanya volume tanah yang dipindahkan saat pemancangan relatif kecil, contohnya: tiang beton berlubang dengan ujung terbuka, tiang beton prategang berlubang dengan ujung terbuka, tiang baja H, tiang baja bulat ujung terbuka, tiang ulir.
3. Tiang tanpa perpindahan (*non displacement pile*) terdiri dari tiang yang dipasang di dalam tanah dengan cara menggali atau mengebor tanah.

Termasuk dalam tiang tanpa perpindahan adalah tiang bor, yaitu tiang beton yang pengecorannya langsung di dalam lubang hasil pengeboran tanah (pipa baja diletakkan dalam lubang dan dicor beton).

Berdasarkan (Gambar 2.1) menunjukkan panjang maksimum dan beban maksimum untuk berbagai macam tiang yang umum dipakai dalam praktek.



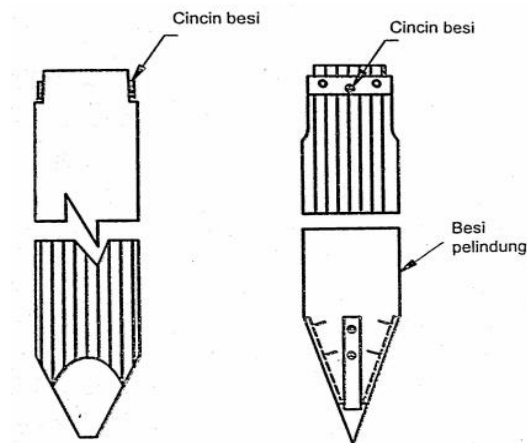
Gambar 2.1. Panjang dan beban maksimum untuk berbagai macam tipe tiang
Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.1.1. Tiang Pancang Kayu

Tiang kayu (Gambar 2.2) adalah tiang yang dibuat dari kayu, umumnya berdiameter antara 10-25 cm. Tiang kayu cerucuk, yang banyak dipakai di Indonesia untuk perbaikan kapasitas dukung tanah lunak berdiameter antara 8–10 cm dan panjang 4 m.

Tiang kayu lebih murah dan mudah penanganannya, permukaan tiang dapat dilindungi ataupun tidak dilindungi tergantung dari kondisi tanah. Tiang kayu ini dapat mengalami pembusukan atau rusak akibat dimakan serangga. Tiang kayu yang selalu terendam air biasanya lebih awet. Untuk menghindari kerusakan pada waktu pemancangan ujung tiang dilindungi dengan sepatu dari besi. Beban

maksimum yang dapat dipikul oleh tiang kayu tunggal dapat mencapai 270 – 300 kN (Hardiyatmo, 2015).



Gambar 2.2. Tiang kayu
Sumber: Hardiyatmo, 2015

Tiang kayu harus diperiksa terlebih dahulu sebelum dipancang, yaitu untuk memastikan bahwa tiang pancang kayu tersebut betul-betul memenuhi ketentuan dari bahan dan toleransi yang diijinkan. Bila menyimpang dari ketentuan yang diijinkan, bisa menyebabkan kesulitan dalam pemancangan ataupun tiang pancang kayu tidak bisa tahan lama.

Keuntungan pemakaian tiang pancang kayu antara lain:

1. Tiang pancang relatif ringan sehingga mudah dalam transport.
2. Kekuatan tarik besar sehingga pada waktu pengangkatan untuk perancangan tidak menimbulkan kesulitan seperti misalnya pada tiang pancang beton precast.
3. Mudah untuk pemotongannya apabila tiang kayu ini sudah tidak dapat masuk lagi ke dalam tanah.
4. Tiang pancang kayu lebih sesuai dan baik untuk friction pile daripada untuk end bearing pile sebab tegangan tekanannya relatif kecil.
5. Relatif flexible dan lenting terhadap arah terhadap horinzontal dibanding dengan tiang-tiang pancang selain dari kayu, maka apabila tiang ini menerima beban horizontal yang tidak tetap, tiang pancang kayu ini akan melentur dan segera kembali ke posisi setelah beban horizontal tersebut hilang.

Kerugian pemakaian tiang pancang kayu antara lain:

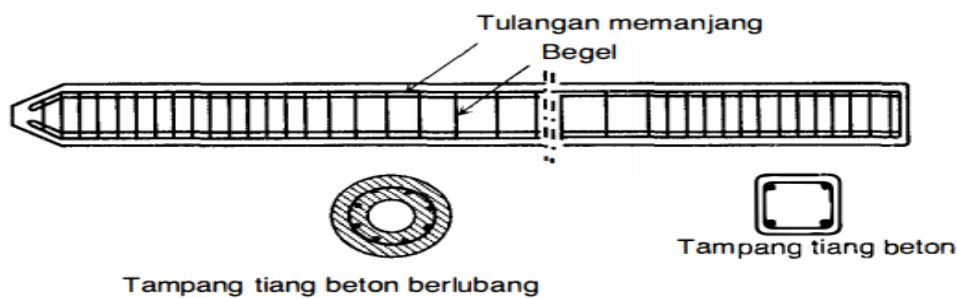
1. Harus selalu terletak di bawah muka air tanah yang terendah agar dapat tahan lama, maka kalau air tanah yang terendah tersebut letaknya sangat dalam.
2. Mempunyai umur yang relatif kecil dibandingkan dengan tiang pancang yang dibuat dari baja atau beton, terutama pada daerah yang tinggi air tanahnya sering naik dan turun.
3. Pada waktu pemancangan pada tanah yang berbatu untuk tiang pancang kayu ini dapat berbentuk sapu atau dapat pula ujung tiang tersebut merenyuk (Bowles, 1984).

2.1.2. Tiang Beton Pracetak

Tiang pancang beton precast adalah tiang dari beton yang dicetak di suatu tempat dan kemudian diangkut ke lokasi rencana bangunan. Tiang beton, umumnya berbentuk prisma atau bulat (Gambar 2.3). Ukuran diameter yang biasanya dipakai untuk tiang yang tidak berlubang di antara 20 sampai 60 cm. Untuk tiang yang berlubang, diameternya dapat mencapai 140 cm. Panjang tiang beton pracetak biasanya bersekitar diantara 20 sampai 40 m. Untuk tiang beton berlubang bisa sampai 60 m. Beban maksimum untuk tiang ukuran kecil berkisar di antara 300 sampai 800 kN (Hardiyatmo, 2015).

Keuntungan pemakaian tiang pancang pracetak, antara lain:

1. Bahan tiang dapat diperiksa sebelum pemancangan.
2. Prosedur pelaksanaan tidak dipengaruhi oleh air tanah.
3. Tiang dapat dipancang sampai kedalaman yang dalam.
4. Pemancangan tiang dapat menambah kepadatan tanah granuler.



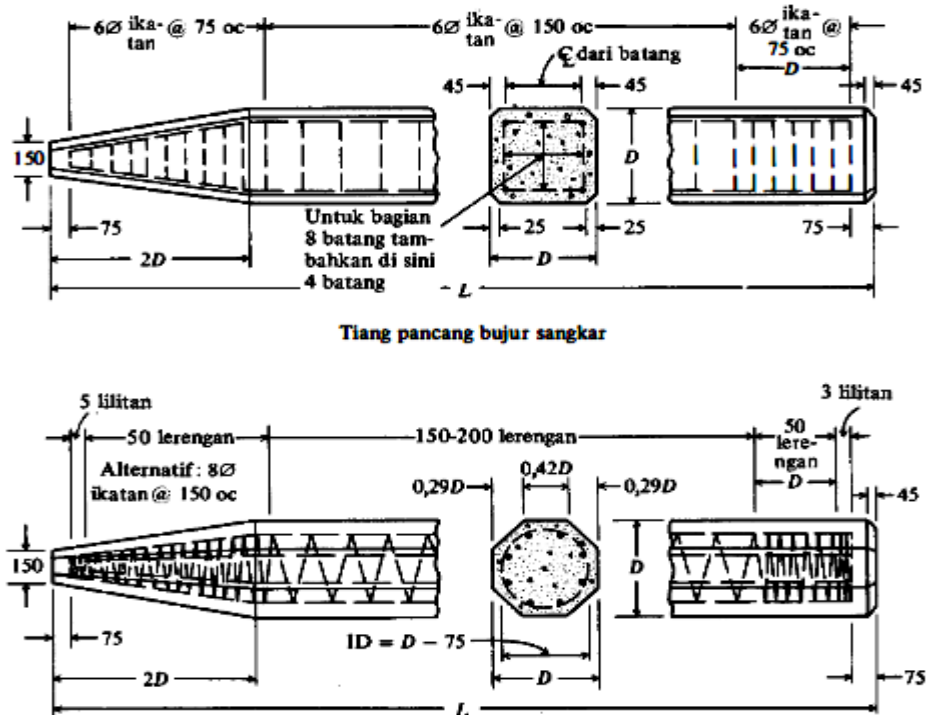
Gambar 2.3. Tiang beton pracetak

Sumber: Hardiyatmo, 2015

Kerugian pemakaian tiang pancang pracetak, antara lain:

1. Pengembangan permukaan tanah dan gangguan tana akibat pemancangan dapat menimbulkan masalah.
2. Kepala tiang kadang-kadang pecah akibat pemancangan.
3. Pemancangan sulit, bila diameter tiang terlalu besar.
4. Pemancangan menimbulkan gangguan suara, getaran dan dformasi tana yang dapat menimbulkan kerusakan bangunan di sekitarnya.
5. Banyaknya tulangan dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi pada waktu pengangkutan dan pemancangan tiang.

Menurut Bowles, (1984) tiang pancang beton dapat dibuat dengan menggunakan penguatan biasa seperti dalam (Gambar 2.4). Tiang pancang beton pracetak yang menggunakan penguatan biasa, dibuat untuk tegangan-tegangan lentur selama waktu pengambilan (*pickup*) dan pengangkutan ke tempat proyek, untuk momen-momen lentur dari beban-beban lateral, serta untuk menyediakan tahanan untuk mencukupi terhadap beban vertikal dan terhadap setiap gaya tegangan yang timbul selama pemancangan.



Gambar 2.4. Pemasangan tulangan tiang pancang beton pracetak

Sumber: Bowles, 1984

Nilai-nilai beban maksimum tiang beton pracetak pada umumnya, yang ditinjau dari segi kekuatan bahan tiangnya dapat dilihat dalam (Tabel 2.1).

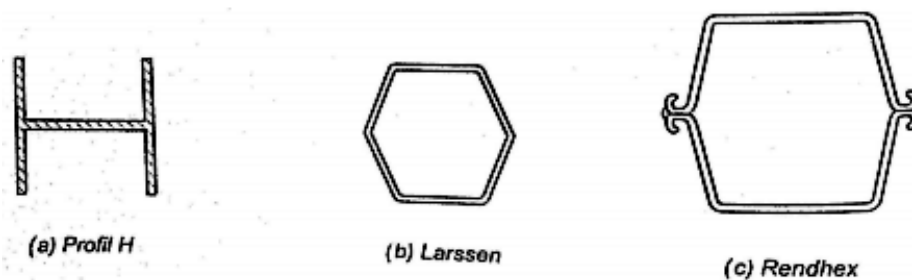
Tabel 2.1. Nilai-nilai tipikal beban ijin tiang beton pracetak

Diameter Tiang (cm)	Beban Tiang maksimum (KN)
30	300 - 700
35	350 - 850
40	450 - 1200
45	500 - 1400
50	700 - 1750
60	800 - 2500

Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.1.3. Tiang Baja Profil

Tiang baja profil termasuk tiang pancang, dengan bahan yang dibuat dari baja profil. Tiang ini mudah penanganannya dan dapat mendukung beban pukulan yang besar waktu dipancang pada lapisan yang keras. Tiang baja profil H, empat persegi panjang, segi enam dan lain-lainnya (Gambar 2.5) (Hardiyatmo, 2015).



Gambar 2.5. Tampang melintang tiang baja profil

Sumber: Hardiyatmo, 2015

Menurut Sardjono, (1988) kebanyakan penampang tiang pancang baja berbentuk profil H, karena terbuat dari baja maka kekuatan dari tiang ini sendiri adalah sangat besar sehingga dalam transport dan pemancangan tidak menimbulkan bahaya patah seperti halnya pada tiang pancang beton precast namun tiang baja ini lemah terhadap karat (*korosi*).

Tiang pancang baja mempunyai potensi kerawanan terhadap korosi. Berkaitan hal tersebut, maka perlu dilakukan penelitian sebelumnya pada bagian mana yang mungkin terjadi korosi. Untuk menghindarinya ruas-ruas yang mungkin terkena korosi harus dilindungi dengan pengecatan menggunakan lapisan pelindung yang telah disetujui dan atau digunakan loam yang lebih tebal. Apabila tiang dipancang pada tanah asli yang kadar oksigennya rendah, maka umur tiang bisa tahan lama. Akan tetapi jika ada bagian tiang pancang yang berhubungan langsung dengan air, maka harus diberi perlindungan, bisa dengan dilapisi beton atau dengan *cathodic protection* (dengan ditimbulkan aliran listrik) agar besi dapat tahan terhadap karat. Perlu diperhatikan, bahwa sebelum tiang baja dipancang, pada kepala tiang harus dipasang topi pemancang (*driving cap*), yang berfungsi untuk menjaga rusaknya kepala tiang akibat pukul dan untuk mempertahankan sumbu tiang pancang segaris dengan sumbu palu. Setelah selesai pemancangan, tiang pancang dengan panjang yang cukup harus ditanamkan ke dalam pur (*pile cap*).

Perlindungan terhadap karat dapat pula dilakukan dengan, antara lain:

1. Mempertebal plat tiang pancang H di daerah yang banyak menimbulkan karat, tebalnya sekurang-kurangnya sama dengan tebal badan tiang pancang H. Dengan adanya penambahan plat ini diperkirakan akan memperpanjang umur tiang sampai 25 tahun.
2. Dengan memberi sarung (*encasement*), seperti halnya dengan pertebalan plat, sarung ini juga diletakkan di daerah di mana akan terjadi korosi . biasanya sarung ini diletakkan sekurang-kurangnya 60 cm di bawah muka air rendah.

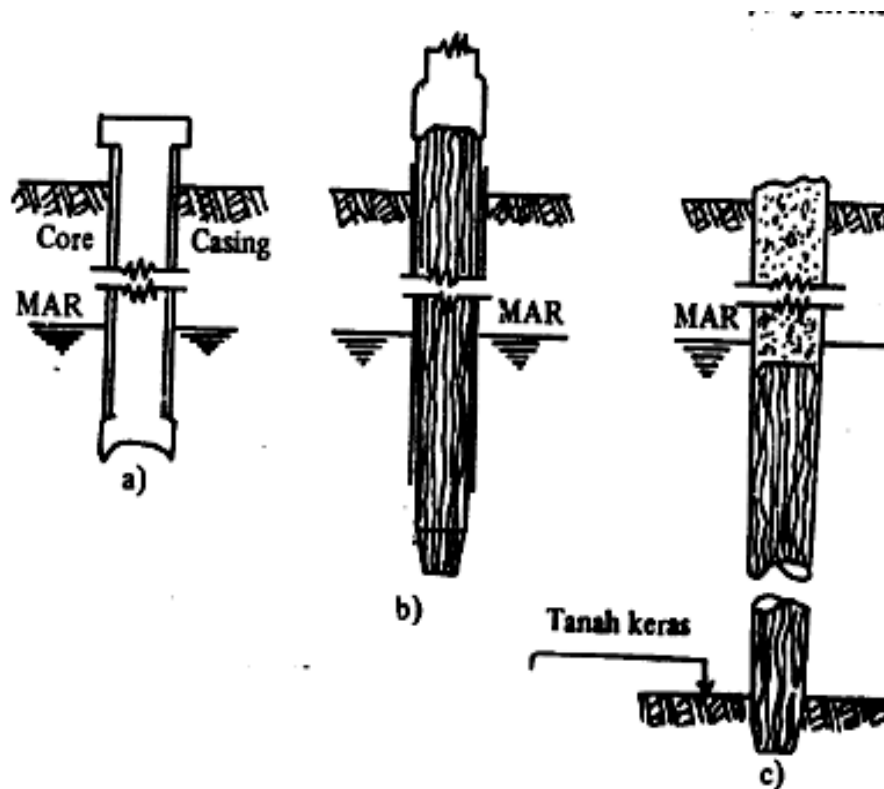
2.1.4. Tiang Komposit

Kombinasi bahan tiang pancang atau tiang bor dengan tiang pancang dapat digunakan untuk mengatasi masalah-masalah pada kondisi tanah tertentu. Problem pembusukan tiang kayu di atas muka air tanah misalnya, dapat diatasi dengan memancang tiang komposit yang terdiri tiang beton di bagian atas yang disambung dengan tiang kayu di bagian bawah zona muka air tanah (Hardiyatmo, 2015).

Menurut Sardjono, (1988) composite pile terdiri dari, antara lain:

1. *Water proofed steel pipe and wood pile*

Tiang ini terdiri dari tiang pancang kayu untuk bagian yang di bawah muka sedangkan bagian atas adalah beton. Diketahui bahwa kayu akan tahan dan awet kalau selalu terendam oleh air atau sama sekali tidak terendam air, karena itu di sini beban bayu diletakkan di bagian bawah yang mana selalu terletak di bawah air tanah seperti terlihat dalam (Gambar 2.6).



Gambar 2.6. *Water proofed steel pipe and wood pile*

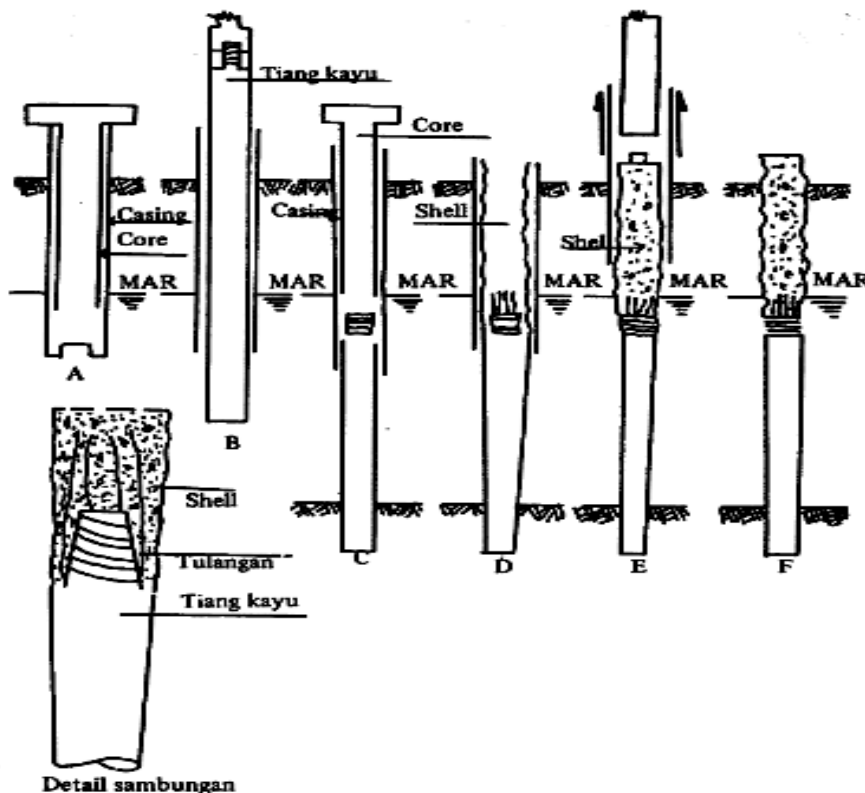
Sumber: Sardjono, 1988

Kelemahan tiang adalah pada saat sambungan apabila tiang pancang ini menerima gaya horizontal yang permanen. terlihat dalam (Gambar 2.6a) *Casing* dan *core* (inti) dipasang untuk meletakkan tiang pancang kayu tersebut dan ini harus terletak di bawah muka air tanah yang terendah. Kemudian pada (Gambar 2.6b) *core* ditarik ke atas dan tiang pancang kayu dimasukkan dalam *casing* dan terus dipancang sampai mencapai lapisan tanah keras. Pada (Gambar 2.6c) setelah mencapai lapisan tanah keras pemancangan dihentikan dan *core* ditarik keluar dari

casing sampai penuh terus dipadatkan dengan menumbukkan *core* ke dalam *casing*.

2. *Composite dropped in-shell and wood pile*

Type tiang ini hampir sama dengan *water proofed steel pipe and wood pile* bedanya hanya disini memakai shell yang terbuat dari bahan logam tipis permukaan diberi alur spiral.



Gambar 2.7. *Composite dropped in-shell and wood pile*

Sumber: Sardjono, 1988

Berdasarkan (Gambar 2.7) secara singkat pelaksanaannya, antara lain:

- A. *Casing* dan *core* dipancang bersama-sama sampai mencapai kedalaman yang telah ditentukan.
- B. Setelah mencapai kedalaman yang dimaksud *core* ditarik keluar dari *casing* dan tiang kayu dimasukkan dalam *casing* terus dipancang sampai mencapai lapisan tanah keras.
- C. Setelah mencapai lapisan tanah keras *core* ditarik keluar lagi dari *casing*.
- D. Kemudian *shell* berbentuk pipa yang diberi alur spiral dimasukkan dalam *casing*, pada ujung bagian bawah *shell* dipasang tulangan berbentuk sangkar

yang mana tulang inidibuat sedemikian rupa sehingga dapat masuk pada ujung atas tiang pancang kayu tersebut.

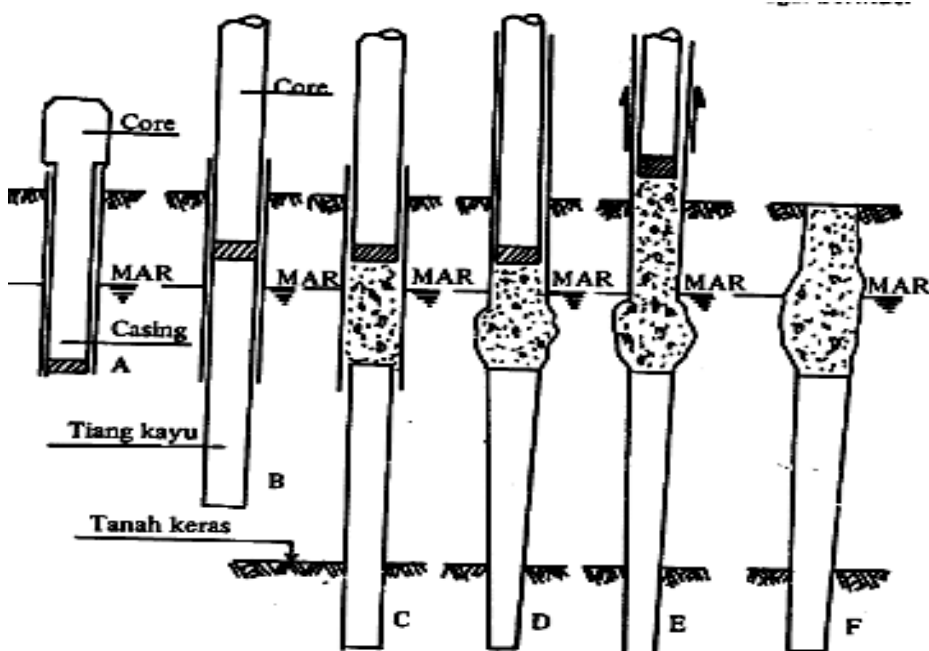
E. Beton kemudian dicor dalam *shell*, setelah *shell* cukup penuh dan padat *casing* ditarik keluar sambil *shell* yang telah terisi beton tadi ditahan dengan cara meletakkan *core* di ujung atas *shell*.

F. Lubang bekas *casing* yang terdapat di sekeliling diisi dengan kerikil.

3. *Composite ungased – concrete and wood pile*

Dasar pemilihan tiang adalah:

- Lapisan tanah keras dalam sekali letaknya sehingga tidak memungkinkan untuk menggunakan *cast in place concrete pile*. Sedangkan kalau menggunakan *precast concrete pile* akan terlalu panjang sehingga akan sulit dalam pengangkutan dan biayanya juga akan lebih besar;
- Muka air tanah terendah sangat dalam sehingga apabila kita menggunakan tiang pancang kayu akan memerlukan galian yang sangat besar agar tiang pancang tersebut selalu di bawah muka air tanah terendah.



Gambar 2.8. *Composite ungased-concrete and wood pile*

Sumber: Sardjono, 1988

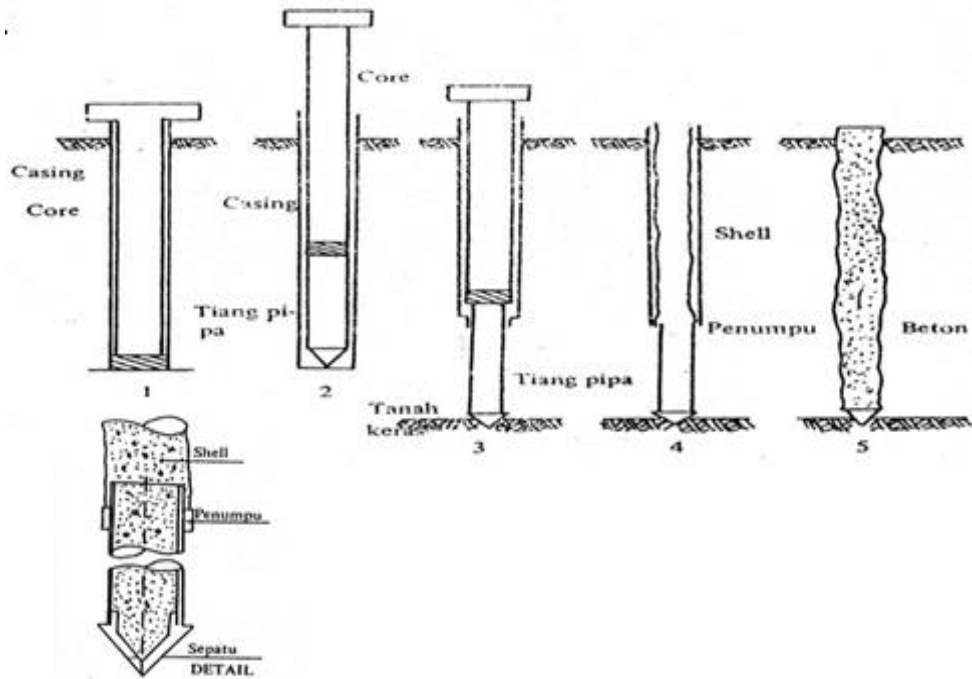
Berdasarkan (Gambar 2.8) adapun prinsip pelaksanaan tiang composite ini adalah sebagai berikut:

- A. *Casing* baja dan *core* dipancang bersama-sama dalam tanah sehingga sampai pada kedalaman tertentu.
- B. *Core* ditarik keluar dari *casing* dan tiang pancang kayu dimasukkan dalam *casing* terus dipancang lapisan tanah keras.
- C. setelah sampai pada tanah keras *core* dikeluarkan lagi dari *casing* dan beton sebagai dicor dalam *casing*. Kemudian *core* dimasukkan lagi dalam *casing*.
- D. Beton ditumbuk dengan *core* sambil ditarik ke atas sampai jarak tertentu sehingga terjadi bentuk beton yang menggelembung seperti bola di atas tiang pancang kayu tersebut.
- E. *Core* ditarik lagi keluar dari *casing* diisi dengan beton lagi sampai padat stinggi beberapa cm di atas permukaan tanah. Kemudian beton ditekan dengan *core* kembali sedangkan *casing* ditarik ke atas sampai keluar dari tanah.
- F. Tiang pancang telah selesai.

4. *Composite dropped – shell and pipe pile*

Dasar pemilihan tiang ini adalah:

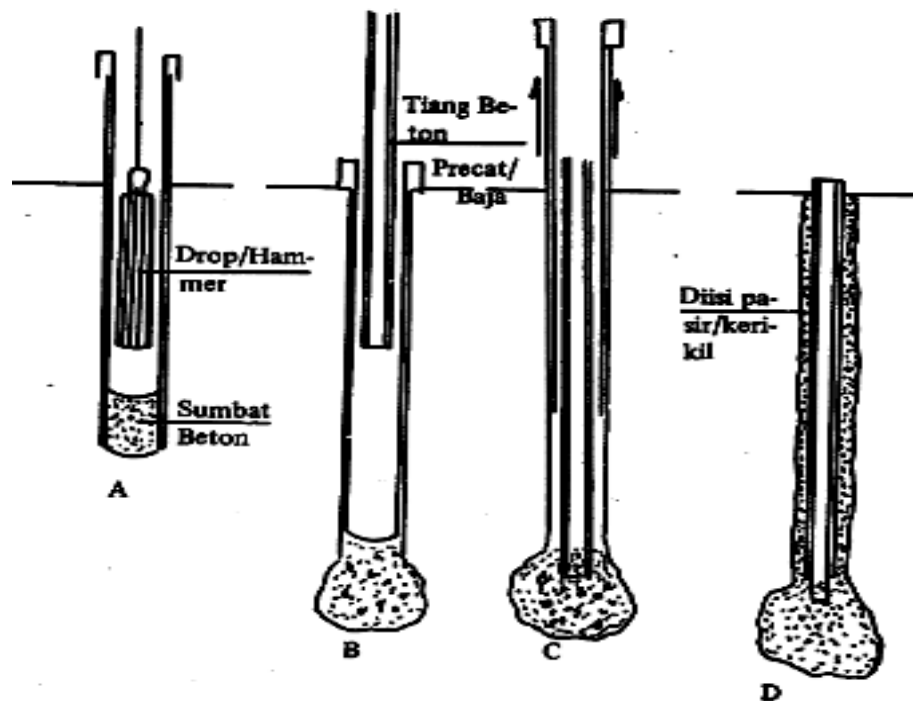
- Lapisan tanah keras terlalu dalam letaknya bila digunakan *cast in place concrete pile*;
- Letak muka air tanah terendah sangat dalam apabila kita menggunakan tiang *composite* yang bawahnya dari tiang pancang kayu.



Gambar 2.9. *Composite dropped-shell and pipe pile*
 Sumber: Sardjono, 1988

5. *Franki composite pile*

Prinsip kerjanya hampir sama dengan tiang Franki biasa, hanya saja pada *Franki composite pile* ini pada bagian atasnya dipergunakan tiang beton *precast* biasa atau tiang profil H dari baja.



Gambar 2.10. *Franki composite pile*

Sumber: Sardjono, 1988

Berdasarkan (Gambar 2.10) adapun pelaksanaan tiang composite ini adalah sebagai berikut:

- A. Pipa dengan sumbat beton yang di cor lebih dahulu pada ujung bawah pipa baja dipancang dalam tanah dengan drop hammer sampai pada tanah keras.
- B. Setelah pemasangan mencapai kedalaman yang telah direncanakan pipa diisi lagi dengan beton dan terus ditumbuk dengan drop hammer sambil pipa ditarik lagi ke atas sedikit sehingga terjadi bentuk beton seperti bola.
- C. Setelah tiang beton precast atau tiang baja H masuk dalam pipa sampai bertumpu pada bola beton pipa ditarik keluar tanah.
- D. Rongga di sekitar tiang beton precast atau tiang baja H diisi dengan kerikil atau pasir.

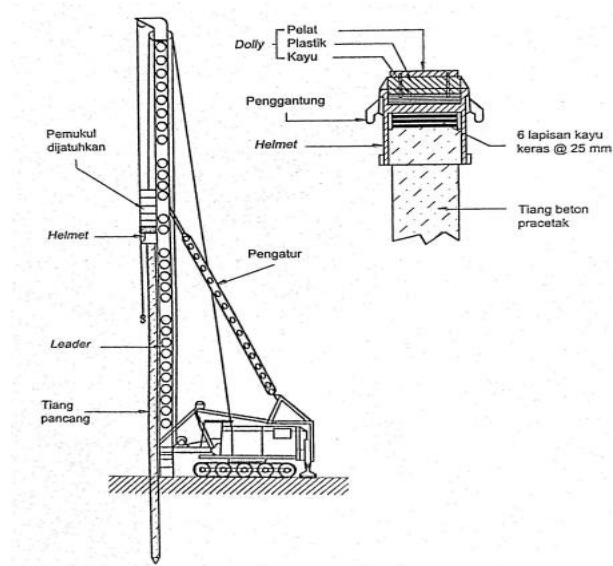
2.2. Alat Pancang Tiang

Pemasangan tiang ke dalam tanah, tiang dipancang dengan alat pemukul yang dapat berupa pemukul (*hammer*) mesin uap, pemukul getar atau pemukul yang hanya dijatuhkan. Tiang dan pemukul dipasang pada peralatan *crane* yang

dilengkapi dengan rangka batang baja sebagai pengatur jatuhnya pemukul ke kepala tiang yang disebut *lead* (Gambar 2.11).

Elemen – elemen penting dalam sistem pemancangan adalah: *lead*, *anvil*, topi (*helmet*), *ram* dan untuk tiang beton, bantalan tiang (*pile cushion*). Berikut ini penjelasan masing – masing elemen (Gambar 2.11).

1. *Lead* adalah rangka baja dengan dua bagian paralel sebagai pengatur tiang agar pada saat tiang dipancang arahnya benar. Jadi *Leader* berfungsi agar jatuhnya pemukul tetap terpusat pada sistem tiang.
2. *Anvil* adalah bagian yang terletak pada dasar pemukul yang menerima benturan dari *ram* dan terletak pada dasar pemukul yang menerima benturan dari *ram* dan mentransfernya ke kepala tiang.
3. Topi (*helmet*) atau *drive cap* (penutup pancang) adalah bahan yang dibuat dari baja cor yang diletakkan di atas tiang untuk mencegah tiang dari kerusakan saat pemancangan dan untuk menjaga agar as tiang sama dengan as pemukul.
4. Bantalan (*cushion*) dibuat dari kayu keras atau bahan lain yang ditempatkan di antara penutup tiang (*pile cap*) dan puncak tiang untuk melindungi kepala tiang dari kerusakan. Bantalan juga menjaga agar energi per pukulan seragam.
5. *Ram* adalah bagian pemukul yang bergerak ke atas dan ke bawah yang terdiri dari piston dan kepala penggerak (*driving head*) (Hardiyatmo, 2015).

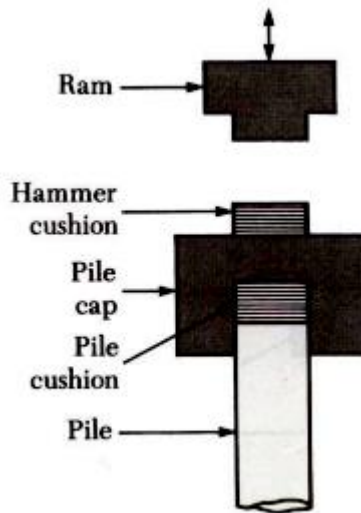


Gambar 2.11. Alat pancang
 Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.2.1. Pemukul Jatuh (*drop hammer*)

Pemukul jatuh terdiri dari blok pemberat yang dijatuhkan dari atas. Pemberat ditarik dengan tinggi jatuh tertentu kemudian dilepas dan meenumbuk tiang. Pemakaian alat tipe ini membuat pelaksanaan pemancangan berjalan lambat, sehingga alat ini hanya dipakai pada volume pekerjaan pemancangan yang kecil (Hardiyatmo, 2015).

Menurut Sardjono (1988), menyatakan bahwa prinsip kerjanya Drop Hammer ditarik ke atas dengan kabel dan kerekan sampai mencapai tinggi jatuh tertentu, kemudian pemukul tersebut jatuh bebas menimpa kepala tiang pancang. Alat pancang ini bekerjanya sangat lambat jika dibandingkan dengan alat-alat pancang lainnya dan jarang dipergunakan dalam pembangunan kontruksi berat dan modern.

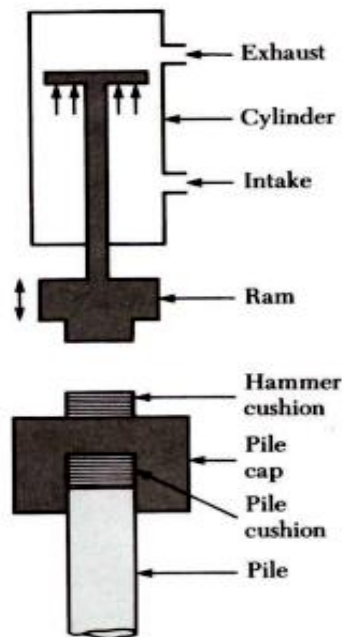


Gambar 2.12. Pemukul jatuh (*drop hammer*)
 Sumber: Rauf, 2012

2.2.2. Pemukul Aksi Tunggal (*single acting hammer*)

Pemukul aksi tunggal berbentuk memanjang dengan ram yang bergerak naik oleh udara atau uap yang terkompresi, sedangkan gerakan turun *ram* disebabkan oleh beratnya sendiri. Energi pemukul aksi tunggal adalah sama dengan berat *ram* dikalikan tinggi jatuhnya (Gambar 2.13) (Hardiyatmo, 2015).

Uap atau tekanan udara digunakan untuk mengangkat balok besi panjang sampai ketinggian yang diperlukan. Balok besi panjang tersebut kemudian jatuh karena gravitasi ke dalam landasan, yang mentransmisikan energi tumbukan ke blok sungkup, dan kemudian ke tiang pancang. Panjang palu haruslah sesuai dengan kecepatan tumbukan, yang tidak sesuai akan memberikan energi pendorong yang kecil (Bowles, 1984). Berat dari hammer berkisar dari 22 sampai 2669 kN (5 sampai 600 kips) dan menghasilkan tenaga dari 20 sampai 2500 kN (15 sampai 1670 kip/ft). Namun, pukulan itu relatif lambat dengan sebagian besar energi yang berasal dari massa ram, dengan kecepatan 50 sampai 80 pukulan per menit (Rauf, 2012).

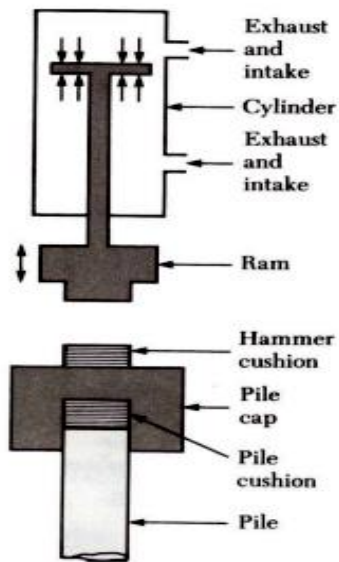


Gambar 2.13. Pemukul aksi tunggal (*single acting hammer*)
 Sumber: Rauf, 2012

2.2.3. Pemukul Aksi Dobel (*double acting hammer*)

Pemukul aksi dobel menggunakan uap atau udara untuk mengangkat *ram* dan untuk mempercepat gerakan ke bawahnya (Gambar 2.14). Kecepatan pukulan dan energi *output* biasanya lebih tinggi daripada pemukul aksi tunggal (Hardiyatmo, 2015).

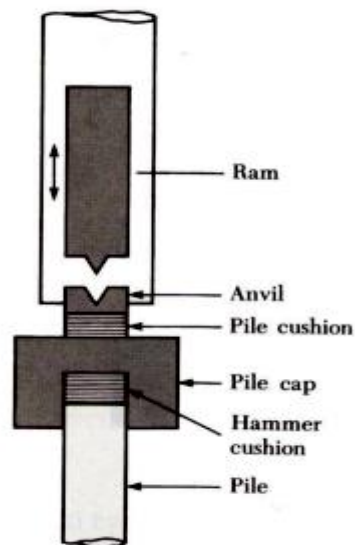
Menurut Sardjono (1988), menyatakan bahwa prinsip kerjanya hammer diangkat ke atas dengan tenaga uap sampai mencapai tinggi jatuh tertentu, kemudian penumbuk (*hammer*) tersebut ditekan ke bawah dengan tenaga uap pula. Jadi di sini hammer jatuh dengan kecepatan yang lebih besar daripada Single Acting Hammer dan Drop Hammer.



Gambar 2.14. Pemukul aksi dobel (*double acting hammer*)
 Sumber: Rauf, 2012

2.2.4. Pemukul Diesel (*diesel hammer*)

Pemukul diesel terdiri dari silinder, *ram*, blok *anvil* dan sistem injeksi bahan bakar. Pemukul tipe ini umumnya kecil, ringan dan digerakkan dengan bahan bakar minyak (Gambar 2.15). Energi pemancangan total yang dihasilkan adalah jumlah benturan dari *ram* ditambah energi hasil dari ledakan (Hardiyatmo, 2015).

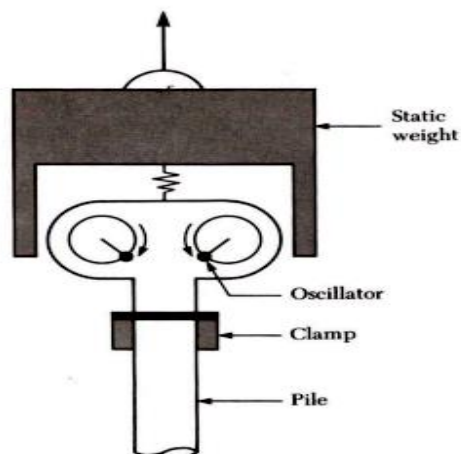


Gambar 2.15. Pemukul diesel (*diesel hammer*)
 Sumber: Rauf, 2012

2.2.5. Pemukul Getar (*vibratory hammer*)

Pemukul getar merupakan unit alat pancang yang bergetar pada frekuensi tinggi (Gambar 2.16). Estimasi kapasitas dukung tiang umumnya didasarkan pada jumlah pukulan yang dibutuhkan yang memancang tiang pada penetrasi yang ditentukan. Setiap jatuhnya pemukul akan memberikan energi pada tiang pancang. Jumlah pukulan total adalah energi total untuk menggerakkan tiang pada penetrasi tertentu. Energi ini dapat dikaitkan dengan tahanan tanah dan kapasitas dukung.

Kehilangan energi akan terjadi, bila sistem pemukul tidak lurus, tebal bantalan terlalu berlebih, dan lain-lain. Semakin tinggi hilangnya energi pemukulan, semakin besar jumlah pukulan yang dibutuhkan untuk penetrasi tiang. Tingginya jumlah pukulan ini dapat menyesatkan dalam penentuan kedalaman tiang pancang yang memenuhi syarat kapasitas dukung (Hardiyatmo, 2015).



Gambar 2.16. Pemukul getar (*vibratory hammer*)
Sumber: Rauf, 2012

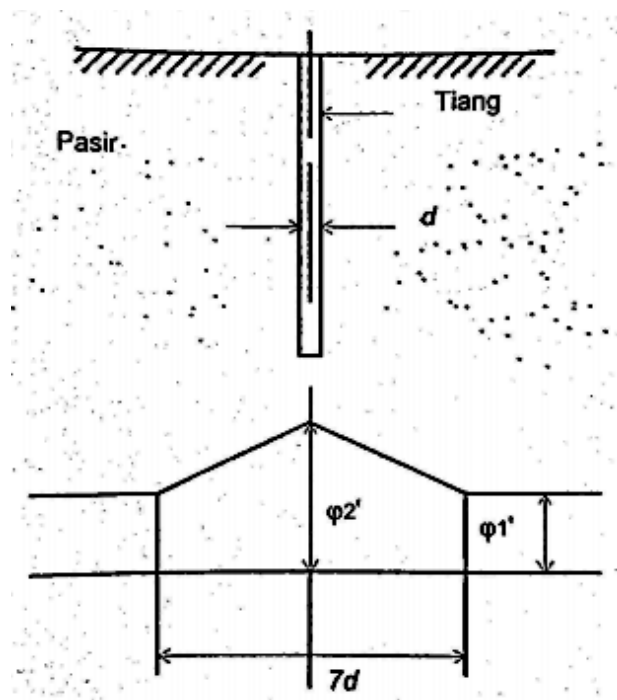
2.3. Pekerjaan Pemasangan Tiang

Pemasangan tiang (dipancang atau di bor) sangat berpengaruh pada kelakuan tiang dalam mendukung beban. Umumnya, tinjauan gangguan akibat pemancangan tiang ditujukan terutama pada perubahan sifat-sifat tanah yang mempengaruhi kapasitas dukungnya. Jika data kondisi tanah setelah pemancangan dapat diperkirakan, maka dapat dibuat cara yang cocok untuk mengevaluasi data laboratorium atau data hasil uji lapangan yang akan digunakan dalam perancangan kapasitas dukung tiang (Hardiyatmo, 2015).

2.3.1. Pengaruh Pemasangan Tiang Pancang dalam Tanah Granuler

Tanah granuler (pasir), tiang yang dipancang dengan cara dipukul atau ditekan ke dalam tanah mengakibatkan perubahan susunan dan pecahnya sebagian butir tanah. Pada kondisi ini, tanah mengalami pemadatan yang menaikkan kuat geser tanah atau berat volume tana. Jika tiang dipancang dalam tanah pasir yang tidak padat, depresi tanah akan terjadi pada tanah yang ditekan oleh tiang tersebut. Bila tanah padat, pemadatan yang terjadi akibat pemancangan relatif kecil dan tahan terhadap penetrasi tiang sangat tinggi, sehingga energi pemancangan yang dibutuhkan juga besar.

Menurut Meyerhof (1959), bahwa akibat pemancangan pemadatan lebih besar terjadi, di bawah dasar tiang daripada bagian atasnya. Penentuan kenaikan besarnya *sudut geser* dalam (φ) tanah. Untuk tanah pasir yang tidak padat, berdasarkan hasil pengujian model dilakukan oleh Kishida (1967), diperoleh kesimpulan bahwa jari-jari pengaruh pemadatan tanah pasir akibat pemancangan sekitar $3,5d$ mengelilingi tiang. Di dalam zona yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari $3,5d$ ini, *sudut gesek* dalam (φ) berkurang secara linier (Gambar 2.17).



Gambar 2.17. Pengaruh pemancangan tiang pada sudut gesek dalam (φ)
Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.3.2. Pengaruh Pemasangan Tiang Pancang dalam Tanah Kohesif

Pemancangan dalam tanah kohesif (lempung dan lanau) sangat berbeda dengan apa yang terjadi pada tanah pasir. Pemancangan tiang di dalam tanah kohesif, biasanya akan mengakibatkan kenaikan permukaan tanah di sekitar tiang, yang diikuti oleh konsolidasi tanah. Deformasi akibat pemancangan dapat mempengaruhi struktur di dekatnya dan dapat mengakibatkan tiang yang dipancang lebih dulu terangkat ke atas akibat pemancangan tiang sesudahnya.

Bila tiang dipancang dalam tanah lempung kaku, cembungan tanah juga akan terjadi, namun tanah ayang terdorong ke atas akan berupa bungkahan-bungkahan atau berupa bahan yang retak-retak. Pada kondisi ini, selama pemancangan, tiang yang dipancang lebih awal dapat terangkat ke atas. Konsolidasi kembali (rekonsolidasi), berjalan sangat lambat dan kuat geser asli tanah mungkin tidak pernah kembali seperti semula selama umur struktur. Berdasarkan pengamatan-pengamatan pemancangan tiang pada tanah kohesif, disimpulkan bahwa akibat pemancangan, susunan tanah menjadi terganggu dan terjadi penurunan kuat geser. Kenaikan kembali kuat gesernya terjadi dengan berjalannya waktu, dilaporkan bahwa paling sedikit 75 % dari kapasitas ultimit tiang dapat tercapai dalam waktu 30 hari setelah pemancangan (Hardiyatmo, 2015).

2.4. Perhitungan Pemancangan

Menurut Dr. Bambang Surendro, perhitungan pemancangan tidak terlepas dari dua hal yaitu kekuatan tiang dari persyaratan-persyaratan pemancangan.

2.4.1. Kekuatan Tiang

Menurut *modified engineering new formula* jumlah pukulan yang diberikan oleh “*hammer*” akan semakin banyak pada pemancangan yang dilakukan pada tanah yang semakin keras. Apabila berat “*hammer*” = W ton, dan tinggi jatuh pemukulan (*hammer*) = h meter, maka tenaga (E) yang diberikan oleh “*hammer*” adalah sebesar $E=W \times h$.

Tenaga yang diberikan oleh “hammer” tidak semuanya dapat dimanfaatkan, karena adanya faktor-faktor lain seperti gesekan. Jika perlawanan oleh = P ton dan masuknya tiang ke tanah sebesar s cm, maka:

$$E = W \times h = p \times s + p \times c \text{ atau}$$

$$P = \frac{W \times h}{s + c} \dots\dots\dots (0.1)$$

Karena adanya faktor keamanan (n), maka Persamaan $P = \frac{W \times h}{s + c}$
 (0.1) menjadi sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{n} \times \frac{W \times h}{s + c} \dots\dots\dots (0.2)$$

dengan:

- P = persamaan oleh tanah (kekuatan tiang maksimum)
- W = berat pemukul (*hammer*)
- h = tinggi jatuh
- s = masuknya tiang ke tanah
- c = konstanta, besarnya 0,25 untuk “*steam hammer*” dan s,5 untuk “*drop hammer*”
- n = faktor keamanan, menurut *engineering new formula*, $n=6$,

sehingga Persamaan $P = \frac{1}{n} \times \frac{W \times h}{s + c}$
 (0.2) menjadi :

$$P = \frac{1}{6} \times \frac{W \times h}{s + c} \dots\dots\dots (0.3)$$

2.4.2. Persyaratan-persyaratan Pemancangan

Persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi dalam melaksanakan pemancangan adalah:

1. *Hammer* tidak boleh terlalu ringan, perbandingan antara berat *hammer* (pemukul) dengan berat tiang adalah sebagai berikut: Berat pemukul (*hammer*) = 3 sampai dengan 3,50 kali berat tiang.
2. Menurut *modified engineering new formula*, untuk menghitung kekuatan tiang maksimum dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{6} \times \frac{E}{s+c} \times \frac{W}{W+P} \dots\dots\dots (0.4)$$

dengan:

W = berat *hammer*

P = berat tiang

3. Persamaan tiang pancang, Persamaan $P = \frac{1}{6} \times \frac{W \times h}{s+c} \dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$ (0.3) atau Persamaan $P = \frac{1}{6} \times \frac{E}{s+c} \times \frac{W}{W+P} \dots\dots\dots$
 $\dots\dots\dots$ (0.4) adalah sebagai dasar atau pedoman untuk menghentikan pemancangan tiang agar tiang tidak rusak karena pukulan.

2.4.3. Penghentian Pemukulan Saat Pemancangan

Pekerjaan pemancangan, bila jumlah pukulan terlalu banayak, maka kepala tiang dapat pecah. Untuk ini diperlukan petunjuk kapan dapat dilakukan penghentian pemukulan, ditunjukkan dalam (Tabel 0.2).

Tabel 0.2. Penghentian pemancangan

Bahan Tiang	Pemukulan dihentikan bila penetrasi tiang mencapai:
Kayu	4 - 5 pukulan/25 mm
Beton bertulang	6 - 8 pukulan/25 mm
Baja	12 - 15 pukulan/25 mm

Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.4.4. Faktor Aman Tiang Pancang

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka kapasitas ultimit tiang dibagi dengan faktor aman tertentu. Fungsi faktor aman adalah:

1. Untuk memberikan keamanan terhadap ketidakpastian dari nilai kuat geser dan kompresibilitas yang mewakili kondisi lapisan tanah.
2. Untuk meyakinkan bahwa penurunan tidak seragam di antara tiang-tiang masih dalam batas-batas toleransi.
3. Untuk meyakinkan bahwa bahan tiang cukup aman dalam mendukung beban yang bekerja.

4. Untuk meyakinkan bahwa penurunan total yang terjadi pada tiang tunggal atau kelompok tiang masih dalam batas-batas toleransi.
5. Untuk mengantisipasi adanya ketidakpastian metode hitungan yang digunakan.

Dari hasil banyak pengujian-pengujian beban tiang, baik tiang pancang maupun tiang bor yang berdiameter kecil sampai sedang (600 mm), penurunan akibat beban kerja (*working load*) yang terjadi lebih kecil dari 10 mm untuk faktor aman yang tidak kurang dari 2,5 (Hardiyatmo, 2015). Besarnya beban kerja (*working load*) atau kapasitas dukung tiang ijin (Q_a) dengan memperhatikan keamanan terhadap keruntuhan adalah nilai kapasitas (Q_u) dibagi dengan faktor aman (F) yang sesuai (Yusti & Fahriani, 2014).

$$Q_a = \frac{Q_u}{F} \dots\dots\dots (0.5)$$

dengan:

- Q_a = kapasitas ijin tiang
- Q_u = kapasitas ultimit tiang
- F = faktor aman

2.5. Kalendering Pemancangan

Secara umum kalendering digunakan pada pemancangan tiang pancang untuk mengetahui daya dukung tanah secara empiris melalui perhitungan yang dihasilkan oleh proses pemukulan alat pancang.

Alat yang digunakan pada saat pelaksanaan kalendering adalah spidol, kertas milimeter, selotip, dan kayu pengarah spidol agar selalu pada posisinya. pengambilan data kalendering dilakukan pada saat tiang mencapai tanah keras, besarnya penetrasi dan *rebound* diambil untuk 10 kali pukulan (Lukman, 2017)

2.6. Kapasitas Tiang Berdasarkan Data Kalendering

Hitungan daya dukung ultimit tiang secara dinamik didasarkan pada rumus tiang pancang dinamik. Rumus ini hanya berlaku untuk tiang tunggal dan tidak memperhatikan hal-hal berikut yakni perilaku tanah yang terletak dibawah dasar kelompok tiang dalam mendukung beban struktur, reduksi tahanan gesek sisi

tiang sebagai akibat pengaruh kelompok tiang dan perubahan struktur tanah akibat pemancangan (Sarita , et al., 2019).

Berdasarkan (Gambar 0.18), saat pemukul pancang membentur kepala tiang, momentum dari *ram* awal:

$$M_r = \frac{W_r \times v_i}{g}$$

Pada akhir periode kompresi:

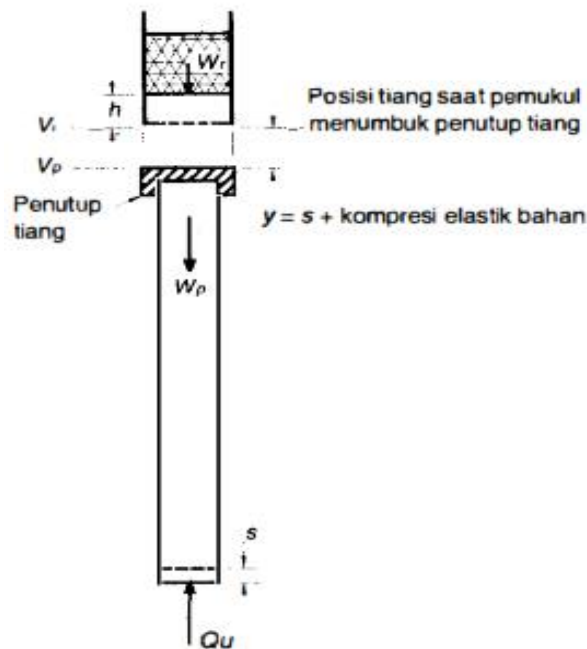
$$M_r = \frac{W_r \times v_i}{g} - I$$

dengan kecepatan:

$$v_{ce} = \left(\frac{W_r \times v_i}{g} - I \right) \left(\frac{g}{W_r} \right) \dots \dots \dots (0.6)$$

Jika dianggap momentum tiang (M_p) pada saat tersebut dengan I, maka:

$$v_{ce} = \left(\frac{g}{W_p} \right) I \dots \dots \dots (0.7)$$



Gambar 0.18. Notasi-notasi dalam rumus dinamik
 Sumber: Hardiyatmo, 2015

Selain itu bila dianggap tiang dan *ram* belum terpisah saat periode akhir kompresi, kecepatan sesaat tiang dan *ram* sama, karena itu Persamaan

$$v_{ce} = \left(\frac{W_r \times v_i}{g} - I \right) \left(\frac{g}{W_r} \right) \dots \dots \dots (0.6) \text{ dan}$$

Persamaan $v_{ce} = \left(\frac{g}{W_p}\right) I$

(0.7),

$$I = v_i \frac{W_r W_p}{g(W_r + W_p)} \dots\dots\dots (0.8)$$

pada akhir periode restitusi, momentum tiang:

$$I + nI = \left(\frac{W_p}{g}\right) v_p \dots\dots\dots (0.9)$$

substitusi Persamaan $I = v_i \frac{W_r W_p}{g(W_r + W_p)}$

..... (0.8) ke Persamaan $I + nI = \left(\frac{W_p}{g}\right) v_p$

..... (0.9), diperoleh:

$$\frac{W_r v_i}{g} - I - nI = \frac{W_r v_r}{g} \dots\dots\dots (0.10)$$

pada akhir periode restitusi, momentum ram:

$$\frac{W_r v_i}{g} - I - nI = \frac{W_r v_r}{g} \dots\dots\dots (0.11)$$

substitusi I,

$$v_r = \frac{W_r - n W_p}{W_r + W_p} v_i \dots\dots\dots (0.12)$$

Energi total yang tersedia dalam tiang dan ram pada akhir periode restitusi adalah:

$$\frac{1}{2} m v^2(\text{tiang}) + \frac{1}{2} m v^2(\text{ram})$$

Substitusi Persamaan $\frac{W_r v_i}{g} - I - nI = \frac{W_r v_r}{g}$

..... (0.10) dan Persamaan $v_r = \frac{W_r - n W_p}{W_r + W_p} v_i$

..... (0.12), dengan beberapa penyederhanaan dapat diperoleh:

$$\frac{W_r}{2g} v_r^2 + \frac{W_p}{2g} v_p^2 = e_h W_r h \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \dots\dots\dots (0.13)$$

Jika sistem 100% efisien, beban ultimit Q_u dikalikan dengan perpindahan tiang (s):

$$Q_u s = e_h W_r h \dots\dots\dots (0.14)$$

Perpindahan puncak tiang sesaat adalah $s + k_1 + k_2 + k_3$, di mana hanya s yang permanen. Energi input aktual pada tiang:

$$e_h W_r h = Q_u (s + k_1 + k_2 + k_3) = Q_u C \dots\dots\dots (0.15)$$

Penggantian suku persamaan energi ekuivalen dengan ekuivalen dari Persamaan $Q_u s = e_h W_r h$
 (0.14), diperoleh:

$$Q_u = \frac{e_h W_r h}{C} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \dots\dots\dots (0.16)$$

Nilai k_2 dapat diambil sebagai kompresi elastis dari tiang $Q_u L / AE$ sehubungan dengan energi regangan $Q_u^2 L / (2AE)$.

2.6.1. Persamaan Hiley (1930)

Bila persamaan $Q_u = \frac{e_h W_r h}{C} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$
 (0.16) diberikan faktor $\frac{1}{2}$ untuk k (untuk energi regangan), diperoleh persamaan Hiley (1930):

$$Q_u = \frac{e_h W_r h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \dots\dots\dots (0.17)$$

Untuk pemukul aksi dobel atau diferensial, Chellis (1961) menyarankan penyesuaian persamaan Hiley (1930):

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \text{ (faktor aman, } F=4) \dots\dots\dots (0.18)$$

dengan:

- e_h = efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)
- E_h = besaran energi pemukul dari pabrik (LF)
- k_1 = kompresi elastis blok penutup (*cap blok*) dan *pile cap*
- k_2 = kompresi elastis tiang
- k_3 = kompresi elastis tanah
- n = koefisien restitusi
- Q_u = kapasitas ultimit tiang
- s = penetrasi pukulan per pukulan
- W_r = berat ram
- W_p = berat tiang termasuk berat penutup tiang (*pile cap*), *driving shoe* dan blok penutup (*cap blok*)

Menurut Chellis, E_h didasarkan pada berat ekivalen W dan tinggi jatuh *ram*, yaitu:

$$E_h = W h = (W_r + \text{berat casing}) \times h \dots\dots\dots (0.19)$$

Nilai-nilai k_1 yang digunakan dalam Persamaan $Q_u = \frac{e_h W_r h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \dots$

..... (0.17) dan Persamaan $Q_u = \frac{e_h E_h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$ (faktor aman, $F=4$) (0.18) dapat

dilihat dalam (Tabel 0.3).

Tabel 0.3. Nilai-nilai k_1

Bahan Tiang	Nilai-nilai k_1 (mm), untuk tegangan akibat pukulan pemancangan di kepala tiang			
	3,5 Mpa	7,0 Mpa	10,5 Mpa	14 Mpa
Tiang baja atau pipa langsung pada kepala tiang	0	0	0	0
Tiang kayu langsung pada kepala tiang	1,3	2,5	3,8	5
Tiang beton pracetak dengan 75 - 100 mm bantalan di dalam cap	3	6	9	12,5
Baja tertutup cap yang berisi bantalan kayu untuk tiang baja H atau tiang pipa	1	2	3	4
Piringan fiber 5 mm diantara dua pelat baja 10 mm	0,5	1	1,5	2

Sumber: Hardiyatmo, 2015

Nilai efisiensi pemukul (e_h) bergantung pada kondisi pemukul dan blok penutup (*capblock*) dan kondisi tanah (khususnya untuk pemukul tenaga uap). Jika belum ada data yang tepat, nilai-nilai e_h dalam dapat dipakai sebagai acuan ditunjukkan dalam (Tabel 0.4).

Nilai-nilai koefisien restitusi n ditunjukkan dalam (Tabel 0.5), di mana nilai-nilai aktualnya bergantung pada tipe dan kondisi bahan *capblock* dan bantalan kepala tiang.

Koefisien k_2 dihitung sama dengan $\frac{Q_u L}{AE}$.

Nilai k_3 dapat diambil :

$k_3 = 0$ untuk tanah keras (batu, pasir sangat padat dan kerikil).

$k_3 = 0,1''$ sampai $0,2''$ (2,5 mm sampai 5 mm) untuk tanah0tanah yang lain.

Tabel 0.4. Nilai efisiensi e_h

Nilai efisiensi e_h	
TIPE	Efisiensi
pemukul jatuh (drop Hammer)	0,75 -1
pemukul Aksi Tunggal	0,75-0,85
pemukul Aksi dobel	0,85
pemukul diesel	0,85-1

Sumber: Hardiyatmo, 2015

Tabel 0.5. Koefisien restitusi n

Koefisien Restitusi n	
Material	n
Broomed Wood	0
Tiang Kayu (Ujung Tidak Rusak)	0,25
Bantalan Kayu Padat Pada Tiang Baja	0,32
Bantalan Kayu Padat Di atas Tiang Baja	0,40
Landasan Baja Pada Baja , pada tiang baja atau beton	0,50
Pemukul besi cor pada tiang beton tanpa penutup (cap)	0,40

Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.6.2. Persamaan Sanders (1851)

Pada rumus Sanders, rumus dinamik didasarkan juga pada hubungan :

Energi yang masuk = energi digunakan + energi hilang

Energi yang digunakan sama dengan tahanan tiang waktu pemancangan (*driving resistance*) dikalikan dengan perpindahan tiang. Jika energi yang masuk (*energi input*) telah diketahui, dapat diestimasi besarnya energi yang hilang yang didasarkan pada pengalaman. Dengan mengamati gerakan tiang waktu dipancang dapat ditentukan tahanan tiang waktu pemancangan. Energi yang dihasilkan oleh pemukul ditransformasikan sebagai gaya (Q_u) yang dihasilkan penetrasi tiang sebesar s dan energi yang hilang sewaktu pemancangan (ΔE):

$$E = Q_u s + \Delta E \dots\dots\dots (0.20)$$

Jika $\Delta E = Q_u C$ dan $E = W_r h$, dengan C = konstanta empiris untuk energi hilang sewaktu pemancangan, W_r = berat pemukul, h = tinggi jatuh pemukul, maka Persamaan (2.19) menjadi:

$$\begin{aligned} W_r h &= Q_u s + Q_u C \dots\dots\dots (0.21) \\ &= Q_u (s + C) \end{aligned}$$

Dari persamaan ini diperoleh,

$$Q_u = \frac{W_r h}{s + C} \text{ (faktor aman, } F = 8) \dots\dots\dots (0.22)$$

Nilai C umumnya diambil 0,1 in (0,25 cm) untuk pemukul dengan mesin tenaga uap dan 1 in (2,5 cm) untuk pemukul yang dijatuhkan. Persamaan $Q_u = \frac{W_r h}{s + C}$ (faktor aman, $F = 8$) $\dots\dots\dots$ (0.22)

merupakan formula pemancangan tiang yang disarankan oleh Sanders (1851).

2.6.3. Persamaan Navy – Mckay

Navy-Mckay memberikan persamaan untuk menghitung daya dukung tiang pancang berdasarkan data uji hasil kalendering sebagai berikut:

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{s \left(1 + 0,3 \frac{W_p}{W_r}\right)} \text{ (faktor aman, } F=6) \dots\dots\dots (0.23)$$

dengan,

- Q_u = kapasitas tiang ultimit
- e_h = efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)
- E_h = besaran energi pemukul dari pabrik (LF)

W_p = berat tiang termasuk berat penutup tiang (*pile cap*), *driving shoe* dan blok penutup (*cap block*) (juga termasuk *anvil* untuk pemukul uap aksi dobel) (F)

W_r = Berat *ram* (F)

s = penetrasi per pukulan (L)

2.6.4. Persamaan Janbu (1953)

Berdasarkan metode ini persamaan untuk menghitung gaya dukung tiang dengan hasil uji dari tes kalendering adalah:

$$Q_u = \frac{e_h W_r h}{K_u s} \text{ (faktor aman, } F= 3 \text{ sampai } 6) \dots\dots\dots (0.24)$$

dengan,

$$K_u = C_d \left[1 + \left(\frac{\lambda}{C_d} \right)^{1/2} \right] \dots\dots\dots (0.25)$$

$$C_d = 0,75 + 0,15 \left(\frac{W_p}{W_r} \right) \dots\dots\dots (0.26)$$

$$\lambda = \frac{e_h E_h L}{A E_s^2} \dots\dots\dots (0.27)$$

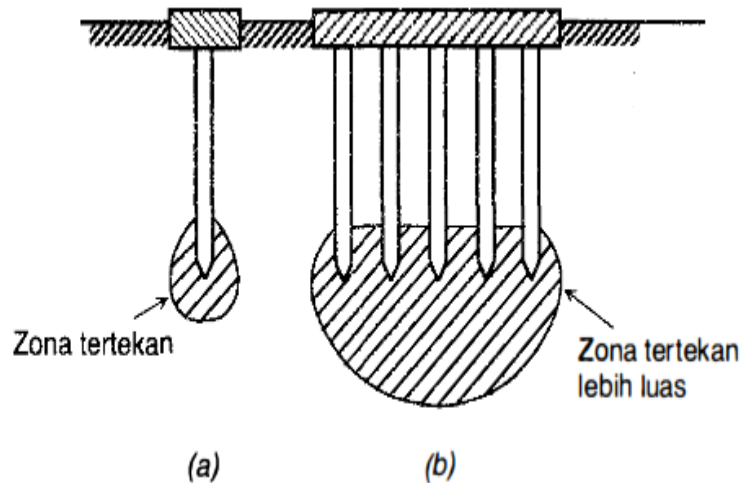
2.7. Kapasitas Kelompok Tiang

Kapasitas kelompok tiang tidak selalu sama dengan jumlah kapasitas tiang tunggal yang berda dalam kelompoknya. Hal ini terjadi jika tiang dipancang dalam lapisan pendukung yang mudah mampat atau dipancang pada lapisan tanah yang tidak mudah mampat, namun dibawahnya terdapat lapisan lunak. Dalam kondisi tersebut, stabilitas kelompok tiang tergantung dari dua hal, yaitu:

1. Kapasitas dukung tanah di sekitar dan di bawah kelompok tiang dalam mendukung beban total struktur.
2. Pengaruh penurunan konsolidasi tanah yang terletak di bawah kelompok tiang.

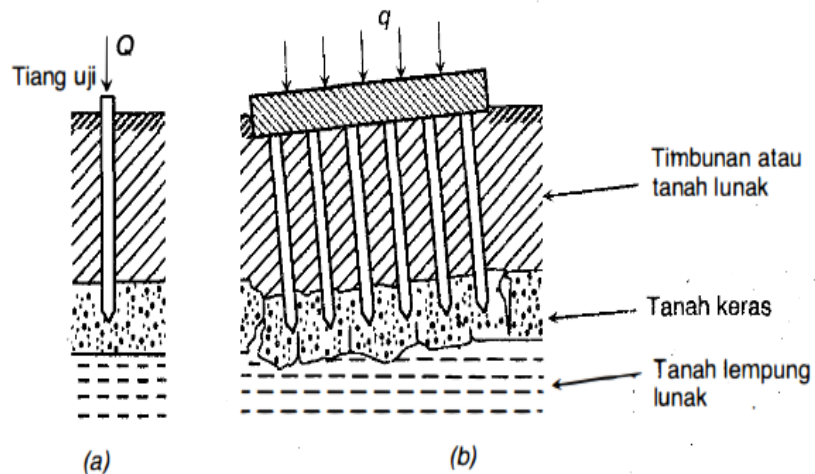
Pemasangan tiang, seperti: dipancang, dibor, digetarkan atau ditekan, akan berpengaruh kecil pada kedua hal tersebut di atas. Penurunan kelompok tiang sama dengan penurunan tiang tunggal, jika dasar kelompok tiang terletak pada lapisan keras.

Penurunan kelompok tiang lebih besar dari penurunan tiang tunggalnya, pada beban struktur yang sama. Karena pada tiang tunggal luas zona tertekan pada bagian bawah tiang sangat lebih kecil daripada luas zona tertekan untuk kelompok tiang, sehingga penurunan kelompok tiang menjadi lebih besar dari pada penurunan tiang tunggal (Gambar 0.19).



Gambar 0.19. Perbandingan zona tanah tertekan
 Sumber: Hardiyatmo, 2015

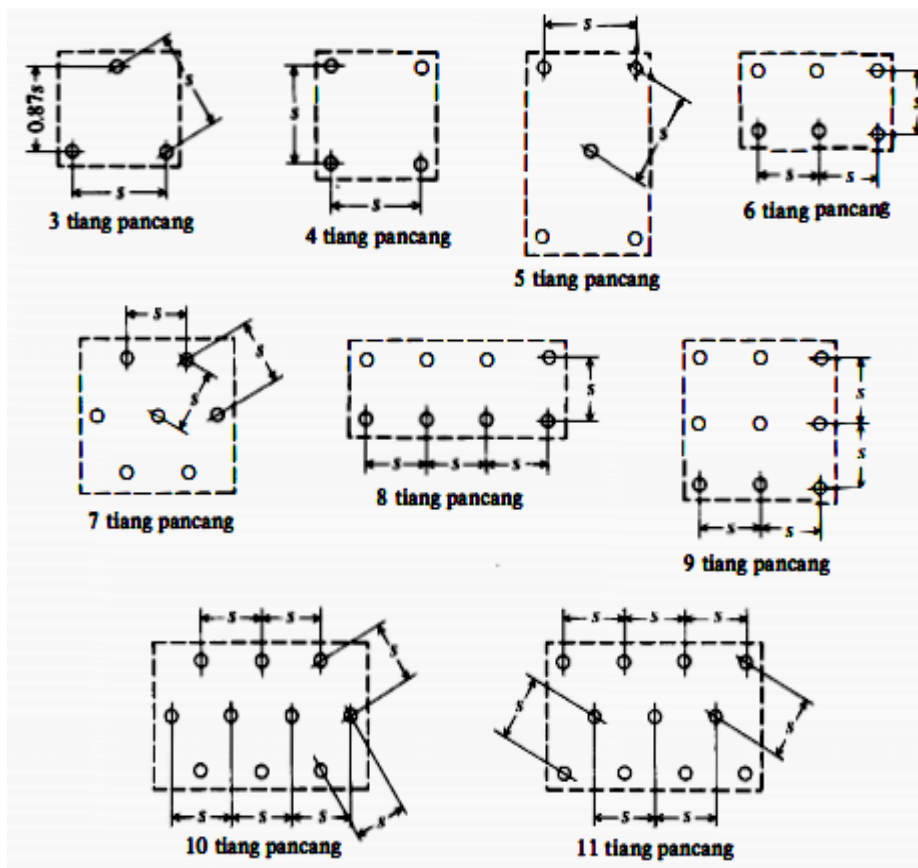
Dari (Gambar 0.20) ini, dibandingkan antara sebuah tiang dari kelompok tiang yang dibebani (dalam uji beban tiang) dengan kelompok tiang saat beban total bangunan telah telah bekerja.



Gambar 0.20. Perbedaan tekanan tiang pada tanah pendukung
 Sumber: Hardiyatmo, 2015

2.7.1. Susunan Tiang

Susunan tiang sangat berpengaruh terhadap luas denah *pile cap*, yang secara tidak langsung tergantung dari jarak tiang. Bila jarak tiang kurang teratur atau terlalu lebar, maka luas denah *pile cap* akan bertambah besar dan berakibat volume beton menjadi bertambah besar sehingga biaya konstruksi membengkak. Pada (Gambar 0.21) ditunjukkan contoh susunan tiang (Bowles, 1984).



Gambar 0.21. Pola susunan pancang
Sumber: Bowles, 1984

2.7.2. Efisiensi Tiang

Besarnya kapasitas dukung total menjadi tereduksi dengan nilai reduksi yang tergantung dari ukuran, bentuk kelompok, jarak, dan panjang tiangnya. Nilai pengali terhadap kapasitas dukung ultimit tiang tunggal dengan memperhatikan pengaruh kelompok tiang, disebut *efisiensi tiang* (E_g).

Menurut Coduro (1994), *efisiensi tiang* (E_g) bergantung pada beberapa faktor, antara lain:

1. Jumlah, panjang, diameter, susunan dan jarak tiang.
2. Model transfer beban (tahanan gesek terhadap tahanan dukung ujung).
3. Prosedur pelaksanaan pemasangan tiang.
4. Urutan pemasangan tiang.
5. Macam tanah.
6. Waktu setelah pemancangan tiang.
7. Interaksi antara pelat penutup tiang (*pile cap*) dengan tanah.
8. Arah dari beban yang bekerja.

Beberapa persamaan efisiensi tiang telah disusulkan untuk menghitung kapasitas kelompok tiang, namun semuanya hanya bersifat pendekatan. Persamaan-persamaan yang diusulkan didasarkan pada susunan tiang, jarak relatif dan diameter tiang, dengan mengabaikan panjang tiang, variasi bentuk tiang yang meruncing, variasi sifat tanah dengan kedalaman dan pengaruh muka air tanah. Salah satu dari persamaan-persamaan efisiensi tiang tersebut, yang disarankan oleh *converse-labarre formula*, sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \phi \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \dots\dots\dots (0.28)$$

dengan:

- E_g = efisiensi kelompok tiang
- m = jumlah baris tiang
- n' = jumlah tiang dalam satu baris
- ϕ = arc tg d/s , dalam derajat
- s = jarak pusat ke pusat tiang (m)
- d = diameter tiang (m)

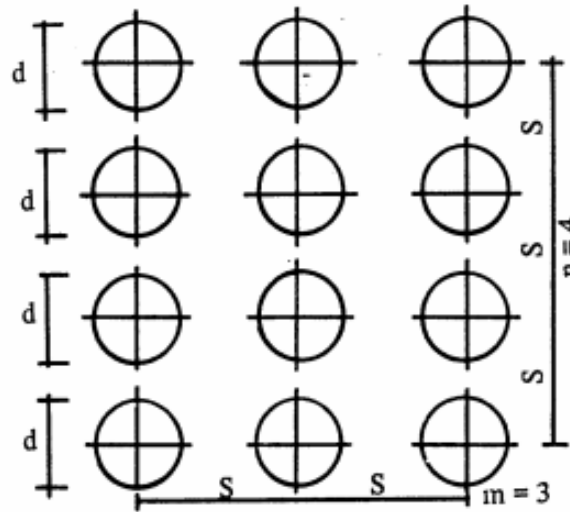
efisiensi kelompok tiang diidentifikasi sebagai:

$$E_g = \frac{Q_g}{nQ_u} \dots\dots\dots (0.29)$$

dengan:

- E_g = efisiensi kelompok tiang
- Q_g = beban maksimum kelompok tiang yang mengakibatkan keruntuhan
- Q_u = beban maksimum tiang tunggal yang mengakibatkan keruntuhan

n = jumlah tiang dalam kelompok



Gambar 0.22. Definisi jarak s dalam hitungan efisiensi tiang (Sardjono, 1988).

2.7.3. Kapasitas Tiang Kelompok

Kapasitas dukung ultimit kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_g = E_g n Q_u \dots\dots\dots (0.30)$$

dengan:

Q_g = beban maksimum kelompok tiang yang mengakibatkan keruntuhan

Q_u = beban maksimum tiang tunggal yang mengakibatkan keruntuhan

n = jumlah tiang dalam kelompok

Kasus di mana pondasi tiang secara keseluruhan berada dalam tanah lempung lunak, maka tiang-tiang dalam mendukung beban sebagian besar didukung oleh tahanan geseknya. Kondisi pondasi tiang semacam ini, disebut pondasi tiang apung (*floating pile*).

Menurut Coduto (1994), Kapasitas kelompok tiang apung dipengaruhi oleh salah satu faktor berikut ini:

1. Jumlah kapasitas tiang tunggal dalam kelompok tiang, bila jarak tiang jauh, atau

2. Tahanan gesek tiang yang dikembangkan oleh gesekan antara bagian luar kelompok tiang dengan tanah disekelilingnya, jika jarak tiang terlalu dekat

Tiang yang dipasang pada jarak yang besar, tanah di antara tiang tidak bergerak sama sekali, ketika tiang bergerak ke bawah oleh akibat beban yang bekerja (Gambar 0.23a). Tetapi, jika jarak tiang-tiang terlalu dekat, saat tiang turun oleh akibat beban, tanah di antara tiang-tiang juga ikut bergerak turun. Pada kondisi ini, kelompok tiang dapat dianggap sebagai satu tiang besar yang dibentuk oleh kelompok tiang dan tanah yang terkurung di dalamnya, dengan lebar yang sama dengan lebar kelompok tiang.

Saat tanah yang mendukung beban kelompok tiang ini mengalami keruntuhan, maka model keruntuhannya disebut *keruntuhan blok* (Gambar 0.23b). Jadi, pada *keruntuhan blok*, tanah yang terletak di antara tiang bergerak ke bawah bersama-sama dengan tiangnya. Mekanisme keruntuhan yang demikian dapat terjadi pada tipe-tipe tiang pancang maupun bor.

Panjang dan jumlah tiang tertentu dalam satu kelompok, terdapat suatu jarak kritis, di mana mekanisme keruntuhan berubah dari bentuk *keruntuhan blok* menjadi bentuk *keruntuhan tiang* tunggal. Untuk jarak tiang yang kurang dari jarak kritisnya, keruntuhan terjadi dengan bidang runtuh (bidang gelincir) yang mengelilingi kelompok tiang-tiang (Gambar 0.23b). Untuk jarak tiang yang besar, keruntuhan terjadi dengan masing-masing tiang menembus lapisan lempungnya, sehingga terjadi gerakan relatif antara tanah lempung dan tiang-tiang (Gambar 0.23b). Jarak kritis tiang-tiang bertambah, jika jumlah tiang dalam kelompoknya bertambah.

