

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. DATA UMUM

2.1.1. Tanah Pesisir Laut

Tanah Pesisir laut merupakan material geoteknik yang terbentuk dari proses sedimentasi di lingkungan perairan, khususnya di wilayah pesisir, muara sungai, dan lepas pantai. Kondisi tanah pada daerah ini umumnya dipengaruhi oleh dinamika pasang surut, arus laut, dan suplai sedimen dari darat. Secara umum, tanah laut memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang berbeda dengan tanah darat, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan konstruksi seperti pelabuhan, *breakwater*, *jetty*, maupun reklamasi. Sifat Kimia Tanah Pasir Pantai

1. Komposisi dan Jenis Tanah laut

a. Lempung Laut (*Marine Clay*)

Mengandung dominan partikel $< 0,002$ mm, tersusun dari mineral *kaolinit*, *montmorillonite*, atau *illite*. Memiliki kadar garam tinggi, struktur cenderung *dispersif*, dan umumnya berada pada kondisi *normally consolidated* hingga *overconsolidated* ringan.

b. Lanau Laut (*Silty Marine Deposit*)

Ukuran butir $0,002$ – $0,075$ mm, terbentuk di perairan tenang seperti teluk dan muara. Kandungan organik rendah–sedang, dengan stabilitas yang rendah akibat mudah terpengaruh arus dan getaran.

c. Pasir Laut (*Marine Sand*)

Terdiri dari pasir halus–sedang ($0,075$ – 2 mm), terdapat di area berenergi gelombang tinggi. Memiliki permeabilitas tinggi namun sering bersifat *loose* sehingga berpotensi *liquefaction*.

d. 4. Tanah Organik Laut (*Marine Peat / Organic Clay*)

Mengandung $> 20\%$ bahan organik, berwarna gelap, sangat lunak, dan sangat kompresibel. Daya dukung rendah dan banyak ditemukan pada kawasan *mangrove* atau rawa pesisir.

2. Karakteristik Fisik Tanah Laut

Karakteristik fisik menggambarkan kondisi alami tanah laut sebelum menerima beban. Secara umum, terutama pada lempung laut, sifat fisiknya adalah sebagai berikut:

a. Kadar Air Tinggi

Kadar air alami sering melebihi batas cair (LL), dengan nilai 60 – 120% atau lebih. Kondisi ini membuat tanah sangat lunak dan mudah mengalami deformasi.

b. Berat Isi Rendah

Berat isi basah sekitar 13 – 17 kN/m³, menunjukkan struktur tanah yang longgar dan berpori besar.

c. Porositas dan Void Ratio Tinggi

Porositas dapat mencapai 50–70%, dengan *void ratio* (e) 1,0–2,5. Nilai tinggi ini menyebabkan potensi penurunan konsolidasi yang besar.

d. Permeabilitas Rendah

Koefisien permeabilitas berada pada kisaran 10^{-9} – 10^{-7} m/s, sehingga air sulit keluar dari pori tanah. Akibatnya, proses konsolidasi alami sangat lambat dan sering membutuhkan percepatan seperti PVD.

e. Struktur Butiran Halus

Lebih dari 70% material berukuran $<0,075$ mm, menyebabkan sifat kohesif dan plastisitas tinggi (LL biasanya $>50\%$).

f. Kandungan Garam dan Sensitivitas

Tanah laut memiliki salinitas tinggi. Setelah pencucian garam, tanah dapat menjadi sensitif dan kehilangan kekuatan, bahkan berpotensi menjadi *quick clay*.

g. Konsistensi Sangat Lunak

Hasil pengujian menunjukkan nilai N-SPT <50 dan $q_c < 1$ MPa, menggambarkan tanah yang sangat lunak dan sangat kompresibel.

2.1.2. Masalah Konstruksi di Tanah Lunak Pesisir

Selain sifat fisik, kimia, dan biologi tanah pasir yang kurang mendukung pertumbuhan tanaman, tanah lunak pesisir juga menghadapi berbagai tantangan dalam dunia teknik sipil dan konstruksi:

1. *Settlement* Berlebihan

Salah satu masalah utama pada tanah lunak adalah kemampuannya yang rendah dalam menahan beban struktural. Tanah lunak cenderung sangat *kompresibel*, artinya ia mudah mengalami penurunan atau *settlement* saat dibebani. *Settlement* dapat terjadi secara langsung (*immediate settlement*) atau dalam jangka waktu lama (*long-term settlement*), tergantung pada karakteristik tanah dan jenis beban

Contoh paling umum adalah pada pembangunan gedung bertingkat, jembatan, atau tanggul di atas tanah lunak. Jika tidak dilakukan perkuatan atau perbaikan tanah terlebih dahulu, struktur di atasnya dapat mengalami kemiringan, retak pada elemen bangunan, atau bahkan keruntuhan struktural. Hal ini bukan hanya menimbulkan kerugian ekonomi, tetapi juga ancaman terhadap keselamatan jiwa.

2. Stabilitas Lereng Rendah

Tanah lunak memiliki kekuatan geser (*shear strength*) yang rendah. Hal ini berdampak besar pada kestabilan lereng, terutama pada area timbunan seperti tanggul, jalan raya, dan *breakwater*. Ketika tanah tidak mampu menahan beban tambahan dari struktur atau dari timbunan itu sendiri, maka risiko longsor atau pergeseran tanah menjadi tinggi.

Masalah ini semakin parah pada musim hujan, di mana kandungan air dalam tanah meningkat dan semakin mengurangi kekuatannya. Kegagalan lereng ini dapat menyebabkan kerusakan serius, baik pada infrastruktur maupun lingkungan sekitar.

3. Laju Konsolidasi Lambat

Konsolidasi adalah proses di mana air pori dalam tanah keluar akibat beban, dan partikel tanah menjadi lebih rapat. Tanah lunak dengan permeabilitas rendah, seperti lempung

atau lanau, memerlukan waktu sangat lama untuk menyelesaikan proses ini. Akibatnya, penurunan tanah berlangsung secara bertahap dalam waktu yang lama (bisa tahunan), dan menimbulkan risiko kerusakan struktural yang berkelanjutan jika tidak diantisipasi. Fenomena ini juga menghambat jadwal konstruksi. Proyek harus menunggu hingga penurunan tanah mencapai titik stabil sebelum pembangunan lanjutan bisa dilakukan. Bila tidak, struktur yang dibangun akan mengalami pergeseran atau kerusakan setelah beberapa waktu digunakan.

4. *Liquefaction* (Pencairan Tanah)

Liquefaction atau pencairan tanah adalah kondisi ketika tanah jenuh air, biasanya berupa pasir atau lanau, kehilangan kekuatan dan kekakuannya secara tiba-tiba akibat beban dinamis, seperti gempa bumi atau getaran besar dari alat berat atau gelombang laut. Dalam kondisi ini, tanah bersifat seperti cairan dan tidak mampu menahan beban apapun. *Liquefaction* sangat berbahaya, terutama di kawasan pesisir yang rawan gempa atau memiliki aktivitas maritim tinggi. Struktur seperti dermaga, pelabuhan, atau jalan pesisir dapat rusak parah dalam waktu sangat singkat tanpa peringatan.

2.1.3. Kebutuhan Perbaikan Tanah di Wilayah Pesisir

Tanah di wilayah pesisir sering kali tidak memenuhi syarat teknis untuk langsung mendukung bangunan atau infrastruktur. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan tanah (*ground improvement*) sebelum konstruksi dapat dilanjutkan. Tujuan perbaikan ini adalah untuk meningkatkan daya dukung tanah, mengurangi penurunan, dan meningkatkan stabilitas.

Beberapa metode perbaikan tanah yang umum digunakan meliputi:

1. *Preloading* (Pra-Pemadatan):

Preloading adalah metode perbaikan tanah yang dilakukan dengan memberikan beban sementara di atas tanah lunak sebelum pembangunan struktur utama. Beban ini biasanya berupa timbunan tanah atau material lain dengan berat yang melebihi atau mendekati beban struktur akhir. Tujuannya adalah untuk mempercepat proses konsolidasi tanah dan mengeluarkan air pori, sehingga penurunan (*settlement*) yang akan terjadi setelah struktur utama dibangun dapat diminimalisasi. Metode ini sering dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) untuk mempercepat aliran air pori ke permukaan. Penggunaan PVD mempercepat waktu konsolidasi yang semula bisa memakan waktu bertahun-tahun menjadi hanya beberapa bulan, tergantung kondisi tanah dan ketebalan lapisan lunak.

2. *Prefabricated Vertical Drain* (PVD):

PVD atau drainase vertikal prefabrikasi adalah saluran drainase buatan berbentuk pita tipis yang dipasang secara vertikal ke dalam tanah menggunakan alat khusus. Fungsinya adalah memperpendek jalur aliran air pori dari dalam tanah menuju permukaan, sehingga mempercepat proses konsolidasi akibat beban dari *preloading*. PVD umumnya dipasang dengan jarak dan kedalaman tertentu tergantung pada analisis geoteknik, dan sering dipadukan dengan *preloading* untuk efisiensi maksimum. PVD sangat efektif pada tanah lempung lunak dengan permeabilitas rendah, yang secara alami membutuhkan waktu sangat lama untuk mengeluarkan air pori.

3. *Vacuum Consolidation*:

Vacuum Consolidation adalah metode perbaikan tanah yang memanfaatkan tekanan negatif (vakum) untuk mengeluarkan air pori dari tanah lunak. Prinsip kerjanya adalah menciptakan tekanan atmosfer lebih rendah (vakum) di atas tanah melalui sistem membran kedap udara, sehingga terjadi perbedaan tekanan antara air pori dalam tanah dan tekanan luar, yang mendorong air keluar dari pori-pori tanah.

Metode ini dapat digunakan sebagai alternatif atau pelengkap dari *preloading* konvensional. Dalam beberapa kasus, *vacuum Consolidation* memberikan hasil penurunan tanah yang lebih cepat dan merata, serta mengurangi risiko kerusakan struktur akibat beban tambahan.

4. *Soil Mixing* (Pencampuran Tanah):

Metode *soil mixing* melibatkan pencampuran tanah lunak dengan bahan pengikat seperti semen, kapur, atau fly ash secara *in-situ* (di tempat). Campuran ini diaduk dengan alat mekanis khusus hingga membentuk kolom atau massa tanah yang telah diperkuat. Tujuan utama dari *soil mixing* adalah meningkatkan kekuatan geser tanah dan mengurangi deformasi. Metode ini sangat cocok untuk tanah yang sangat lunak, seperti gambut atau lempung organik, yang tidak bisa ditangani dengan metode konvensional. *Soil mixing* bisa dilakukan dalam dua cara: *dry mixing* (tanpa air tambahan) dan *wet mixing* (dengan *slurry* semen dan air). Metode ini sangat efektif untuk memperkuat tanah di bawah fondasi atau tanggul.

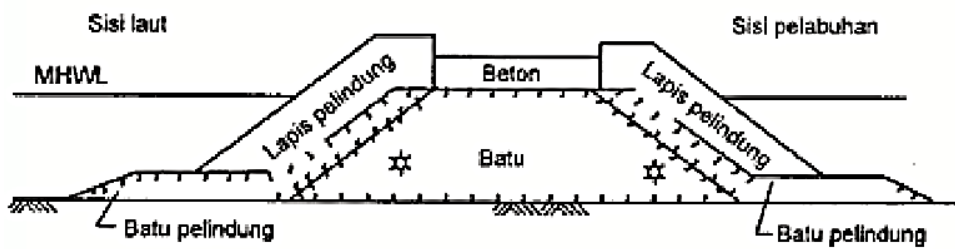
5. *Stone Column* (Kolom Batu):

Stone column adalah metode perbaikan tanah yang melibatkan pemasangan kolom vertikal dari agregat batu atau kerikil ke dalam lapisan tanah lunak. Kolom ini dipasang dengan menggunakan alat khusus seperti *vibratory probe* atau *boring rig*. Setelah kolom terpasang, beban dari atas akan disalurkan melalui kolom batu ke lapisan tanah yang lebih keras di bawah. Selain meningkatkan daya dukung tanah secara lokal, *stone column* juga membantu mempercepat konsolidasi dengan menyediakan jalur drainase air pori. Metode ini sangat efektif untuk area yang memerlukan perbaikan daya dukung tanpa perlu mengganti seluruh volume tanah lunak.

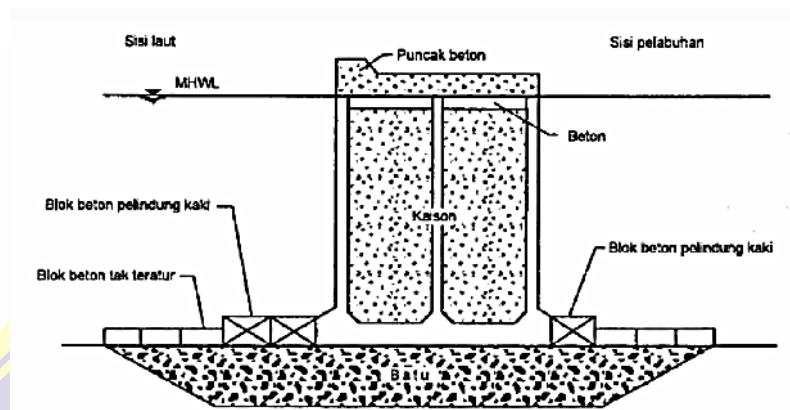
2.2. **BREAKWATER**

Pemecah gelombang (*breakwater*) adalah bangunan yang digunakan untuk melindungi daerah perairan pelabuhan dari gangguan gelombang. Bangunan ini memisahkan daerah perairan dari laut bebas, sehingga perairan pelabuhan tidak banyak dipengaruhi oleh gelombang besar di laut. Dengan adanya pemecah gelombang ini daerah perairan pelabuhan menjadi tenang dan kapal bisa melakukan bongkar muat barang dengan mudah.

Ada beberapa macam pemecah gelombang ditinjau dari bentuk dan bahan bangunan yang digunakan. Menurut bentuknya pemecah gelombang dapat dibedakan menjadi pemecah gelombang sisi miring gambar 2.1, sisi tegak gambar 2.2. dan campuran. Pemecah gelombang bisa dibuat dari tumpukan batu, blok beton, beton massa, turap dan sebagainya.



Gambar 2. 1 Pemecah Gelombang Sisi Miring
 Sumber : Bambang Triatmodjo (2009)



Gambar 2. 2 Pemecah Gelombang Sisi Tegak
 Sumber : Bambang Triatmodjo (2009)

Mengingat tujuan utama pemecah gelombang adalah untuk melindungi kolam pelabuhan terhadap gangguan gelombang, maka pengetahuan tentang gelombang dan gaya-gaya yang ditimbulkannya merupakan faktor penting dalam perencanaan. Pemecah gelombang harus mampu menahan gaya-gaya gelombang yang bekerja. Pada pemecah gelombang sisi miring, butir-butir batu atau blok beton harus diperhitungkan sedemikian rupa sehingga tidak runtuh oleh serangan gelombang. Demikian juga, pemecah gelombang dinding tegak harus mampu menahan gaya-gaya pengguling yang disebabkan oleh gaya gelombang dan tekanan hidrostatis. Selain itu, tanah dasar juga harus mampu mendukung beban bangunan di atasnya.

Batu adalah salah satu bahan utama yang digunakan untuk membangun pemecah gelombang. Mengingat jumlah yang diperlukan sangat besar maka ketersediaan batu di sekitar lokasi pekerjaan harus diperhatikan. Ketersediaan batu dalam jumlah besar dan biaya angkutan dari lokasi batu ke proyek yang ekonomis akan mengarahkan pada pemilihan pemecah gelombang tipe tumpukan batu. Faktor penting lainnya adalah karakteristik dasar laut yang mendukung bangunan tersebut di bawah pengaruh gelombang. Tanah dasar (fondasi bangunan) harus mempunyai daya dukung yang cukup sehingga stabilitas bangunan dapat dijamin. Pada pantai dengan tanah dasar lunak, dimana daya dukung tanah kecil, maka konstruksi harus dibuat ringan (memperkecil dimensi) atau memperlebar dasar sehingga bangunan berbentuk trapezium (sisi miring) yang terbuat dari tumpukan batu atau blok beton. Apabila daya dukung tanah besar maka dapat digunakan pemecah gelombang sisi tegak. Sering dijumpai tanah dasar sangat lunak sehingga tidak mampu mendukung beban di atasnya. Untuk mengatasi masalah tersebut perlu

dilakukan perbaikan tanah dasar dengan mengeruk tanah tersebut dan menggantinya dengan pasir, atau dengan memancang cerucuk bambu yang akan berfungsi sebagai fondasi.

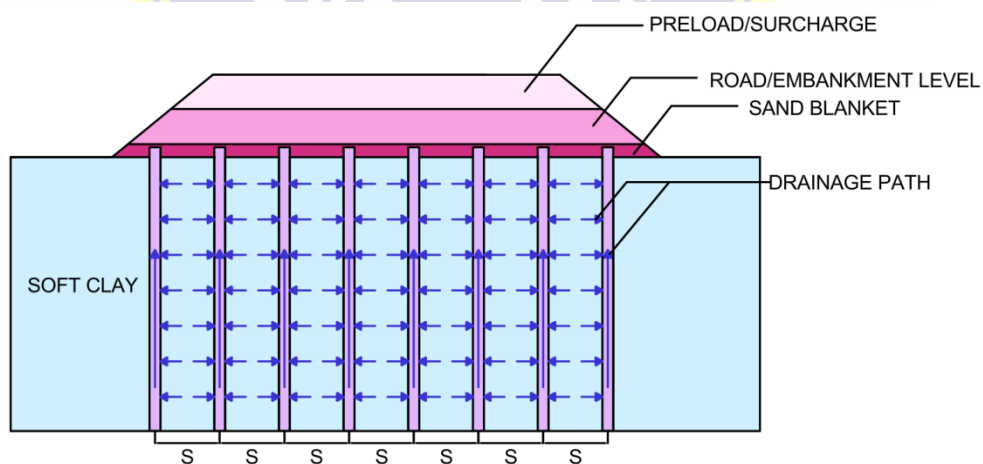
Selain itu kedalaman air juga penting terutama di dalam analisis stabilitas bangunan. Di daerah pantai yang dalam dimensi pemecah gelombang sisi miring (trapezium) menjadi besar yang berarti dibutuhkan bahan bangunan menjadi mahal. Dengan demikian apabila kedalaman air besar pemakaian pemecah gelombang sisi miring tidak ekonomis. Dalam hal ini dipakai pemecah gelombang sisi tegak.

Stabilitas pemecah gelombang sisi tegak tergantung pada dimensi bangunan. Berat sendiri bangunan harus mampu menahan gaya-gaya gelombang. Perbandingan antara tinggi (H) dan lebar (B) bangunan juga mempengaruhi stabilitas. Semakin besar kedalaman diperlukan lebar bangunan lebih besar. Perbandingan antara lebar dan tinggi pemecah gelombang tidak boleh kurang dari tiga perempat ($B > 0,75H$). Dengan demikian di laut yang sangat dalam pemakaian pemecah gelombang sisi tegak tidak ekonomis lagi. Pada kondisi ini digunakan pemecah gelombang tipe campuran. Bagian bawah dari bangunan ini terbuat dari tumpukan batu sedang bagian atas merupakan bangunan sisi tegak.

2.3. PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)

Budhu (2020) *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, sering disebut drainase sumbu, digunakan untuk mempercepat konsolidasi dengan memperpendek jalur drainase. Drainase ini terdiri dari inti plastik dengan saluran yang dibungkus filter geotekstil. Drainase dipasang dalam pola kisi segitiga atau persegi. Jarak antar drain dan kondisi drainase batas menentukan waktu untuk mencapai tingkat konsolidasi yang diinginkan. Diameter ekivalen PVD jauh lebih kecil daripada drainase pasir, tetapi menawarkan hambatan aliran yang lebih rendah serta lebih cepat dan ekonomis untuk dipasang.

Pemasangan drainase vertikal di lapangan sering diikuti dengan penambahan beban dengan melebihi ketinggian timbunan (*surcharge*). Penambahan beban tersebut dapat mempercepat konsolidasi. Apabila sudah mencapai penurunan tertentu, maka kelebihan tanah (*surcharge*) akan dibongkar. Skema drainase vertikal dan horizontal dengan penambahan beban ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Skema Drainase Vertikal dan horizontal dengan Penambahan Beban
Sumber : Data pribadi (2025)

Tabel 2. 1 Tipe-Tipe Drainase Vertikal

Tipe Drainase	Cara Pemasangan	Diameter drainase (m)	Jarak tipikal (m)	Panjang maksimum (m)
Drainase pasir	Dipancang atau digetarkan mandrel ujung tertutup (tipe perpindahan)	0,15 – 0,6	1 – 5	≤ 30
Drainase pasir	Batang berlubang flight auger kontinyu (perpindahan kecil)	0,3 – 0,5	2 – 5	≤ 35
Drainase pasir	Disemprotkan (tanpa perpindahan)	0,2 – 0,3	2 – 5	≤ 30
<i>Prefabricated sand drains (sandwicks)</i>	Dipancang atau digetarkan mandrel ujung tertutup; <i>flight auger</i> ; bor cuci putar (perpindahan besar atau kecil)	0,06 – 0,15	1,2 – 4	≤ 30
<i>Prefabricated band-shaped drains (PVD)</i>	Dipenetrasi atau digetarkan dengan mandrel tertutup (perpindahan besar atau kecil)	0,05 – 0,1 (diameter ekuivalen)	1,2 – 3,5	≤ 60

Sumber : Holtz dkk., (1991)

Drainase vertikal pracetak atau *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dikembangkan oleh Kjellman pada tahun 1936. Pemakaian PVD lebih menguntungkan dibandingkan dengan penggunaan drainase kolom pasir karena gangguan tanah yang dapat mengganggu kinerja drainase lebih kecil.

Drainase vertikal yang banyak digunakan untuk saat ini adalah drainase vertikal pracetak terdiri dari lapisan inti terbuka yang berbentuk pita menerus yang dilindungi dengan saringan pembungkus. Selubung luar PVD berfungsi sebagai pemisah aliran air terhadap tekanan tanah disekitarnya dan sebagai filter sehingga butiran halus tidak masuk ke dalam inti. Selubung tersebut umumnya terbuat dari geotekstil 17 nir-ayam (*non-woven*) dengan bukaan pori tidak lebih dari 75 μm dengan permeabilitas minimum 15×10^{-4} m/detik. Lapisan inti harus mampu mengalirkan air yang masuk melewati saringan pembungkus pada tekanan sebesar 350 kN/m².

Penggunaan PVD perlu diperhatikan dengan seksama, mengenai permabilitas dari filter/saringannya dan kapasitas pengeluaran air (*well discharge capacity*), karakteristik mekanik seperti kuat tarik dari inti dan filternya (*tensile strength of core and filter*) dan kuat tekuk (*buckling strength*) serta ketahanannya terhadap degradasi fisik dan biokimia dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan yang tidak ramah.

2.3.1. Karakteristik PVD

1. Pola Pemasangan

Drainase vertikal dapat dipasang dengan pola segitiga atau bujursangkar. Pola bujursangkar lebih mudah diaplikasikan di lapangan, namun pola segitiga umumnya memberikan konsolidasi yang lebih seragam (Indrarnatna dkk., 2014). Pola pemasangan drainase vertikal disajikan pada Gambar 2.4. Hubungan antara jarak drainase vertikal dengan diameter pengaruh drainase vertikal (D) ditunjukkan pada persamaan berikut :

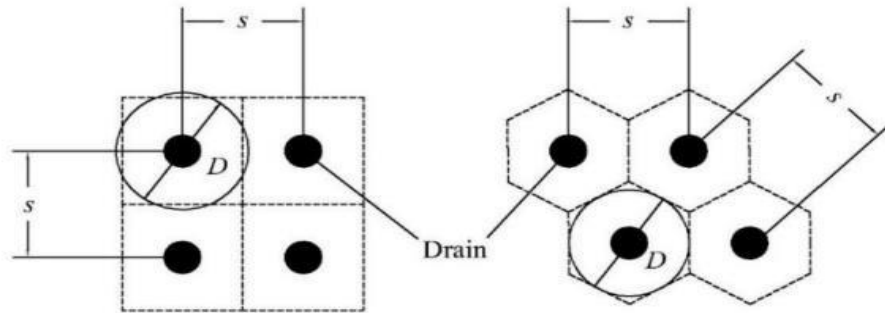
$D = 1,13s$ (pola bujursangkar)

$D = 1,05s$ (pola segitiga)

dengan,

D : diameter pengaruh drainase vertikal (m)

S : jarak antar drainase vertikal (m)

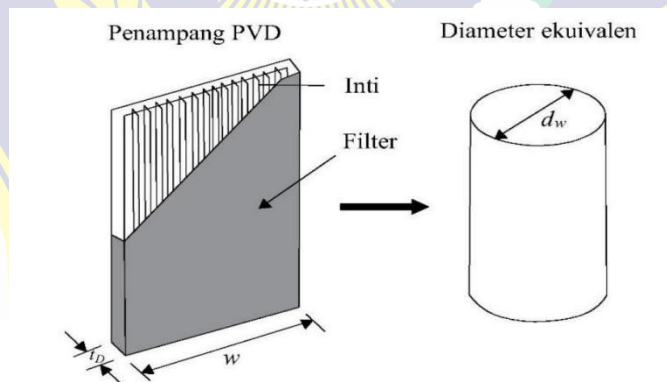


Gambar 2. 4 Pola Pemasangan PVD

Sumber : Indrarnatna dkk., (2014)

2. Diameter Ekuivalen

Drainase vertikal yang berbentuk kolom pasir, diameternya ditentukan oleh jenis mandrel. PVD yang berbentuk pita bertampang persegi panjang (dengan lebar w dan tebal t), diameternya harus dinyatakan dalam diameter ekuivalen, dinotasikan dengan d_w , karena teori konsolidasi radial mengasumsikan drainase vertikal berbentuk lingkaran. Skema diameter ekuivalen drainase vertikal disajikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Penampang dan Diameter Ekuivalen

Sumber : Indrarnatna dkk., (2014)

Hansbo (1979) melakukan studi menggunakan metode elemen hingga yang menghasilkan persamaan untuk menentukan diameter ekuivalen sebagai berikut:

$$d_w = \frac{2(w+tD)}{\pi} \quad (2.1)$$

Dari penelitian menggunakan metode elemen hingga, Rixner (1986) mengusulkan persamaan :

$$dw = \frac{(w+tD)}{\pi} \quad (2.2)$$

Penelitian yang lebih baru dari Long dan Covo (1994) menyatakan bahwa diameter ekuivalen dapat ditentukan menggunakan plotter elektrik analog dengan persamaan :

$$dw = 0,5w + 0,7tD \quad (2.3)$$

Abuel-naga dan Bouazza (2009) mengusulkan persamaan untuk menentukan diameter ekuivalen PVD sebagai berikut:

$$dw = 0,4546 tD \quad (2.4)$$

Menurut Ariza (2014), salah satu hal yang harus dipertimbangkan adalah pengaruh gangguan tanah pada zona di sekitar PVD, yang disebut juga sebagai zona pengotoran (*smear zone*). Konsolidasi dapat mengalami gangguan akibat rusaknya struktur atau susunan lempung selama proses instalasi PVD di lapangan dengan bantuan mandrel.

Gangguan tanah ini disebut juga smear, yang mengakibatkan berkurangnya koefisien permeabilitas arah horizontal (k_h). Oleh karena itu, untuk menentukan derajat konsolidasi radial (U_h) dengan mempertimbangkan *smear zone*, maka persamaan derajat konsolidasi horizontal adalah sebagai berikut:

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{m}\right) \quad (2.5)$$

dengan:

$$m = \ln\left(\frac{n}{s}\right) - 0,75 + \frac{s^2}{n^2} + \frac{k_h}{k_s} \ln\left(\frac{n^2 - s^2}{s^2}\right) \quad (2.6)$$

Carrillo (1942) mengusulkan persamaan untuk mendapatkan derajat konsolidasi rata-rata untuk aliran air vertikal dan aliran air radial (U_r) yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$U_r = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \times 100\% \quad (2.7)$$

Sementara itu, faktor waktu yang digunakan untuk drainase vertikal (T_v) dan drainase radial (T_h) adalah sebagai berikut:

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \text{ dan } T_h = \frac{c_h t}{D^2} \quad (2.8)$$

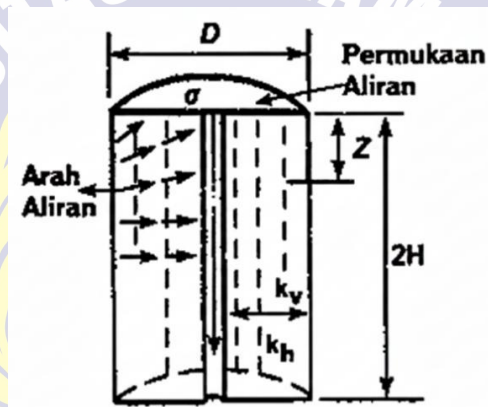
Fungsi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak adalah sebagai berikut:

1. Gangguan pada tanah yang diakibatkan saat pemasangan lebih kecil.

2. Waktu yang dibutuhkan saat kontrol kualitas lebih cepat.
3. Kualitas PVD cenderung seragam.
4. Tahan terhadap deformasi besar tanpa terlalu banyak kehilangan fungsi drainase.
5. Kontaminasi butiran halus pada tanah asli jauh lebih kecil.
6. Pemasangan lebih cepat dan ekonomis.

Teori konsolidasi akibat aliran air pori dalam arah horizontal menuju vertical drain didasarkan pada asumsi bahwa setiap vertical drain mempunyai daerah pengaruh yang berbentuk silinder dengan panjang yang sama dengan panjang vertical drain itu sendiri, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6.

Dalam proses pemasangan, PVD dapat dipasang dengan konfigurasi bentuk pemasangan segitiga ataupun segiempat, tergantung kondisi dan kebutuhan di lapangan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Lama waktu konsolidasi dalam perencanaan vertical drain sangat tergantung pada parameter tanah, terutama nilai koefisien konsolidasi horizontal (C_h). Biasanya, nilai C_h ini diambil dengan didasarkan pada nilai koefisien konsolidasi vertikal (C_v). Sebagai pedoman, dapat digunakan perbandingan nilai C_h/C_v yang disarankan oleh Jamiolkowski et al (1983) dan diperlihatkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2. 6 Daerah Pengaruh Vertical Drain
Sumber : Jamiolkowski et al (1983)

Tabel 2. 2 Perbandingan Nilai C_h/C_v

Sifat Lapisan Tanah Lempung	C_h/C_v
Relatif <i>homogen</i> (hampir tidak ada lapisan permeable)	1 - 1.5
Lempung endapan (terdapat lapisan pasir yang tidak kontinu)	2 - 4
Lempung berlapis (<i>varved clay</i>) atau lempung dengan lapisan pasir yang lebih kurang kontinu	3 - 15

Sumber : Jamiolkowski et al (1983)

2.3.2. Hubungan PVD Dan *Breakwater*

Hubungan antara *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan konstruksi *breakwater* terletak pada fungsi PVD sebagai metode perbaikan tanah untuk meningkatkan kestabilan tanah dasar yang menerima beban timbunan *breakwater*. Konstruksi *breakwater* umumnya dibangun menggunakan timbunan batuan dengan beban yang besar sehingga memberikan tambahan

tegangan yang signifikan pada tanah dasar, khususnya pada kawasan pesisir yang didominasi tanah lempung lunak. Tanah lunak memiliki *permeabilitas* rendah dan kuat geser yang kecil sehingga tidak mampu secara langsung menahan beban timbunan tanpa mengalami penurunan (*settlement*) dan deformasi yang besar. Oleh karena itu, penggunaan PVD menjadi bagian penting dalam sistem perencanaan *breakwater* untuk mempercepat proses konsolidasi tanah sebelum struktur menerima beban penuh.

Ketika timbunan *breakwater* diletakkan di atas tanah lunak, tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*) akan meningkat akibat pembebanan. Pada kondisi alami tanpa perbaikan tanah, disipasi tekanan air pori berlangsung sangat lambat karena air pori hanya mengalir secara vertikal melalui lapisan tanah dengan *permeabilitas* rendah. Kondisi tersebut menyebabkan proses konsolidasi membutuhkan waktu yang lama sehingga tanah dasar belum mencapai kondisi stabil ketika konstruksi *breakwater* mulai beroperasi. Akibatnya, *breakwater* berpotensi mengalami penurunan berlebih, perubahan elevasi struktur, retakan pada lapisan pelindung, hingga ketidakstabilan lereng timbunan akibat rendahnya daya dukung tanah dasar.

Penggunaan PVD pada konstruksi *breakwater* bertujuan untuk memperpendek lintasan aliran air pori sehingga proses disipasi tekanan air pori dapat berlangsung lebih cepat. Dengan berkurangnya tekanan air pori, tegangan efektif tanah meningkat sehingga kuat geser dan daya dukung tanah dasar juga meningkat. Peningkatan kondisi tanah tersebut sangat berpengaruh terhadap stabilitas *breakwater* karena struktur harus mampu menahan beban timbunan batuan, tekanan hidrostatis, serta gaya gelombang laut dalam jangka panjang. Dengan demikian, percepatan konsolidasi menggunakan PVD secara langsung berhubungan dengan pengurangan risiko penurunan diferensial, deformasi timbunan, dan kegagalan stabilitas pada konstruksi *breakwater*.

Selain itu, hubungan PVD dan *breakwater* juga berkaitan dengan efisiensi pelaksanaan konstruksi. Pada proyek *breakwater*, tahapan pembangunan umumnya dilakukan secara bertahap sesuai jadwal proyek. Jika proses konsolidasi tanah berlangsung terlalu lama, maka pekerjaan konstruksi berikutnya dapat tertunda dan mempengaruhi target penyelesaian proyek. Oleh karena itu, penerapan PVD digunakan untuk mempercepat tercapainya kondisi tanah yang stabil sehingga pelaksanaan konstruksi *breakwater* dapat dilakukan dengan lebih aman, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan perencanaan proyek di kawasan pesisir

2.3.3. Tahapan Pengawasan PVD dan Monitoring Settlement

Pengawasan pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *monitoring settlement* pada konstruksi *breakwater* Lamongan *Shorebase* dilakukan secara bertahap untuk memastikan proses percepatan konsolidasi tanah lunak berjalan sesuai dengan perencanaan. Tahapan pengawasan tersebut meliputi:

1. Pengukuran dan Penentuan Titik PVD

Sebelum pemasangan dilakukan, dilakukan pengukuran titik koordinat dan jarak antar PVD sesuai layout desain menggunakan alat ukur seperti total station dan meter ukur. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan pola pemasangan, baik pola segitiga maupun pola persegi, sesuai dengan perencanaan sehingga distribusi drainase tanah dapat bekerja secara optimal.

2. Pemeriksaan Material PVD

Material PVD diperiksa terlebih dahulu sebelum dipasang. Pemeriksaan meliputi kondisi inti drain, filter pembungkus, lebar drain, dan kemungkinan kerusakan material. Material yang rusak dapat menghambat aliran air pori dan menurunkan efektivitas konsolidasi tanah.

3. Pemasangan PVD Menggunakan Mandrel

PVD dipasang menggunakan alat pancang berupa mandrel yang terpasang pada crawler crane atau stitcher rig. Mandrel ditekan masuk ke dalam tanah hingga mencapai kedalaman rencana. Selama proses pemasangan dilakukan pengawasan terhadap:

- Kedalaman penetrasi PVD.
- Posisi titik pemasangan.
- Jarak antar drain.
- Kondisi mandrel agar tetap tegak.

Kedalaman pemasangan biasanya diperiksa menggunakan indikator kedalaman pada alat atau meteran untuk memastikan PVD mencapai lapisan tanah yang direncanakan.

4. Penarikan Mandrel dan Pemotongan PVD

Setelah kedalaman tercapai, mandrel ditarik secara perlahan agar PVD tetap tertinggal di dalam tanah. Bagian atas PVD kemudian dipotong sesuai elevasi permukaan kerja. Pengawasan dilakukan untuk memastikan PVD tidak ikut terangkat saat mandrel dicabut.

5. Pemasangan *Settlement Plate*

Sebelum timbunan preload dilakukan, dipasang instrumen settlement plate pada area pengamatan. *Settlement plate* terdiri dari pelat baja dan pipa pengukur yang digunakan untuk memantau besarnya penurunan tanah selama proses konsolidasi berlangsung.

6. Pelaksanaan Timbunan *Preloading*

Setelah seluruh PVD dan *settlement plate* terpasang, dilakukan penimbunan *preload* secara bertahap. Pengawasan dilakukan terhadap tinggi timbunan dan kestabilan tanah agar tidak terjadi keruntuhan atau pergeseran tanah akibat pembebanan yang terlalu cepat.

7. Monitoring *Settlement*

Monitoring *settlement* dilakukan secara berkala menggunakan alat waterpass atau automatic level untuk mengukur penurunan elevasi pada settlement plate. Pengamatan dilakukan harian atau mingguan tergantung kondisi proyek. Data hasil pengukuran dicatat untuk mengetahui laju penurunan tanah terhadap waktu.

8. Monitoring Tekanan Air Pori

Selain settlement, dilakukan juga pengamatan tekanan air pori menggunakan piezometer. Instrumen ini digunakan untuk mengetahui proses disipasi tekanan air pori selama konsolidasi berlangsung. Semakin kecil tekanan air pori, maka proses konsolidasi tanah menunjukkan perkembangan yang baik.

9. Monitoring Pergerakan Lateral Tanah

Pada area timbunan tinggi, pengawasan tambahan dilakukan menggunakan inclinometer untuk memantau pergerakan lateral tanah. Monitoring ini bertujuan untuk mengantisipasi potensi kelongsoran akibat beban preload.

10. Evaluasi Data Monitoring

Data settlement, tekanan air pori, dan pergerakan tanah dianalisis dan dibandingkan dengan hasil perencanaan atau pemodelan menggunakan aplikasi geoteknik seperti Settle3D. Dari hasil evaluasi tersebut dapat diketahui apakah target derajat konsolidasi telah tercapai dan apakah tanah sudah cukup stabil untuk melanjutkan pekerjaan konstruksi *breakwater*. Dengan tahapan pengawasan yang sistematis dan penggunaan instrumen geoteknik yang tepat, proses percepatan konsolidasi tanah lunak menggunakan PVD dapat berjalan lebih efektif, aman, dan sesuai target waktu pelaksanaan proyek

2.4. KONSOLIDASI

Konsolidasi tanah dalam mekanika tanah merujuk pada proses penurunan volume tanah akibat pengurangan kandungan air pori yang terjadi ketika tanah mengalami beban eksternal. Proses ini terjadi terutama pada tanah berbutir halus seperti lempung, di mana air yang terkandung dalam pori tanah tertekan keluar seiring waktu, mengakibatkan penurunan tinggi tanah. beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab-sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan (Das dalam Mochtar, 1998). Secara umum, pemampatan pada tanah disebabkan oleh pembebanan yang dapat dibagi dalam tiga kelompok besar, yaitu:

- Pemampatan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air.
- Konsolidasi primer (*primary Consolidation*), yang merupakan akibat keluarnya air pori dari tanah.
- Konsolidasi sekunder (*secondary Consolidation*), yang merupakan hasil dari perubahan volume pada tanah berbutir halus akibat penyesuaian plastis struktur tanah.

Besarnya pemampatan tanah total dalam Das (1990), adalah

$$S_t = S_i + S_{cp} + S_{cs} \quad (2.9)$$

dimana :

S_t = *total settlement*

S_i = *immediate settlement*

S_{cp} = *Consolidation primer settlement*

S_{cs} = *Consolidation secondary settlement*

2.4.1. Consolidation Settlement (S_c)

Menurut Wahyudi (1997), besar pemampatan tanah akibat konsolidasi primer dari tanah lempung ini tergantung dari kondisi sejarah tanahnya, yaitu *normally consolidated* (NC) atau *overconsolidated* (OC).

- Kondisi *Normally Consolidated* (NC)

Tekanan efektif *overburden* pada saat itu adalah merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah itu. Besarnya pemampatan NC dapat dihitung sebagai berikut

$$S_c = \frac{H}{1+e_0} \left[C_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_c} \right] \quad (2.10)$$

dimana :

H = tebal lapisan lempung (*compressible soil*)

e_0 = angka pori awal (*initial void ratio*)

C_c = *Compression index*

σ''_o = *Overburden pressure effective*

b. Kondisi *Overconsolidated* (OC)

Tekanan efektif overburden yang dialami tanah saat itu lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami oleh tanah tersebut sebelumnya. Perumusan pemampatan kosolidasi untuk tanah ini dirumuskan sebagai berikut:

- Bila : $(p_o + \Delta p) \leq p_o$ maka :

$$S_c = \frac{H}{1+e_0} \left[C_c \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o} \right] \quad (2.11)$$

- Bila : $(p_o + \Delta p) > p_o$ maka :

$$S_c = \left[\frac{H}{1+e_0} C_s \log \frac{P_c}{P_o} \right] + \left[\frac{H}{1+e_0} C_c \log \frac{P_o + \Delta p}{P_c} \right] \quad (2.12)$$

dimana :

H = tebal lapisan lempung (*compressible soil*)

e_0 = angka pori awal (*initial void ratio*)

C_c = *Compression Index*

C_s = *Swelling Index*

ΔP = *Surcharge* (besarnya tegangan di muka tanah)

P_o = *Overburden pressure effective*

P_c = tegangan prakonsolidasi efektif

Apabila lapisan tanahnya heterogen (berlapis-lapis) maka formula perhitungan dapat dilakukan di setiap lapisannya, sehingga totalnya adalah :

dimana :

$$S_c = \frac{H_i}{1+e_0} \left[C_s \log \left(\frac{\Delta p_i}{P_{oi}} \right) \right] \quad (2.13)$$

dimana :

H_i = tebal sub lapisan i

P_{oi} = *Overburden pressure* pada lapisan i

Δp_i = variasi tegangan vertikal yang diterima oleh lapisan ke-i

2.4.2. Parameter Tanah untuk Perhitungan *Consolidation Settlement* (S_c)

Berikut ini adalah cara menentukan parameter tanah yang digunakan dalam perhitungan *Consolidation settlement* menurut Wahyudi (1997) :

1. Tebal lapisan *compressible*

Tebal lapisan *compressible* (H) yang diperhitungkan adalah yang masih bisa mengalami proses konsolidasi primer, yaitu yang memiliki nilai N-SPT < 10. Sedangkan untuk tanah dengan N-SPT > 10 dianggap sudah tidak mengalami proses konsolidasi primer sehingga tidak perlu diperhitungkan sebagai bagian dari tebal lapisan *compressible* (H).

2. Beban atau *Surcharge*

Surcharge yang dimaksud adalah besarnya beban yang bekerja di atas permukaan tanah asli (*Compressible Soil*) dalam satuan tegangan. Persamaan yang digunakan ditentukan dari distribusi tegangan tanah yang dialami.

$$P_o = \gamma_{\text{timbunan}} \times h_{\text{timbunan}} \quad (2.14)$$

dimana :

γ_{timbunan} = berat volume dari tanah timbunan

h_{timbunan} = tinggi timbunan

Bila timbunan terendam air, maka dipakai harga γ timbunan efektif (γ'')

3. *Compression* dan *Swelling Index*

Harga *compression index* (C_c) dan *Swelling Index* (C_s) diperoleh dari hasil tes laboratorium (*Consolidation test*).

4. Angka Pori

Angka pori inisial (e_o) diperoleh dari hasil tes laboratorium (*Volumetric dan Gravimetric*)

5. *Overburden Pressure*

Overburden pressure effective (p_o') adalah tegangan vertikal efektif dari tanah asli, yaitu:

$$P_o' = \gamma' \times h \quad (2.15)$$

dimana :

γ' = $\gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{air}}$ (bila ada air tanah)

h = setengah dari tebal lapisan lempung yang diperhitungkan

6. Distribusi tegangan tanah

Distribusi tegangan tanah adalah pembagian beban yang diterima oleh tanah. Berikut adalah persamaan distribusi tegangan tanah dengan beban trapesium :

Beban bentuk trapesium (panjang menerus)

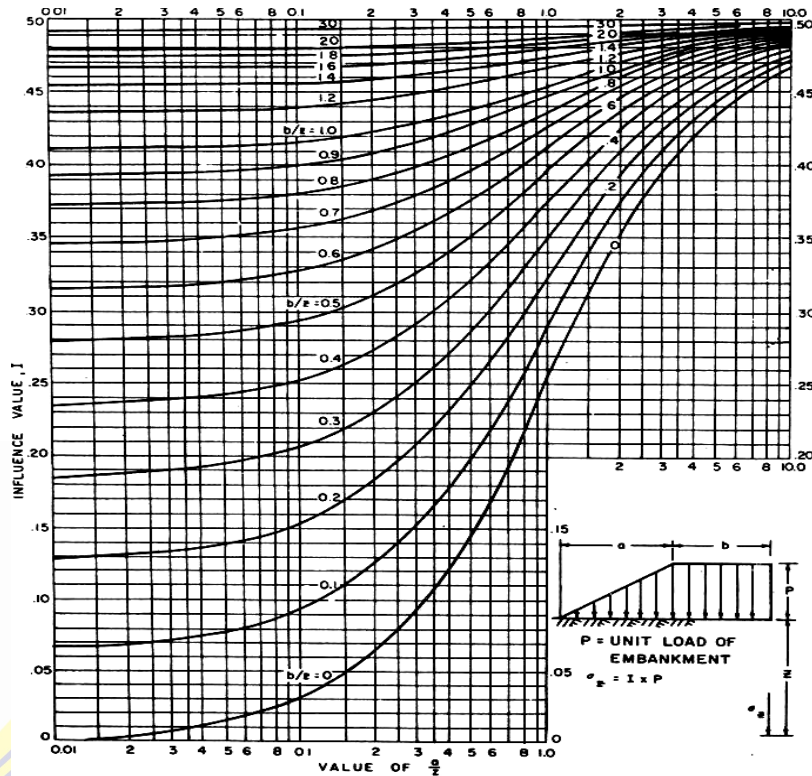
$$\Delta p_z = I \times q_o \quad (2.16)$$

dimana :

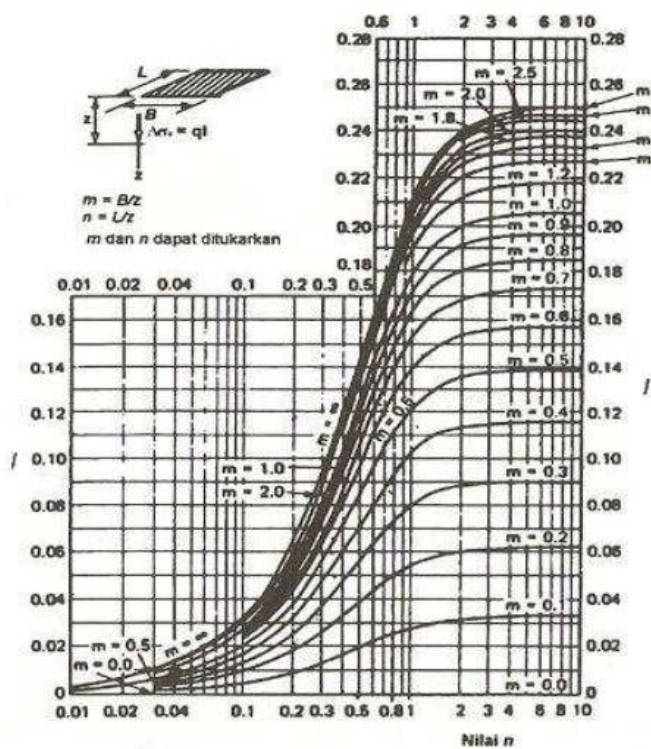
I = faktor pengaruh tegangan ditentukan dari grafik

q_o = beban terbagi rata di atas luasan

Faktor pengaruh ini digunakan untuk menghitung distribusi tambahan tegangan vertikal di dalam tanah akibat beban di permukaan dapat ditentukan menggunakan gambar 2.7 dan 2.8



Gambar 2. 7 Grafik Faktor Pengaruh untuk Beban Bentuk Trapesium
 Sumber : Mochtar (2000)



Gambar 2. 8 Grafik Faktor Pengaruh untuk Beban Bentuk Persegi
 Sumber : Mochtar (2000)

2.4.3. Lamanya Pemampatan Tanah

Menurut Terzaghi dalam Das (1985), lama waktu konsolidasi (t) adalah sebagai berikut :

$$t = \frac{T_v(H_{dr})^2}{C_v} \quad (2.17)$$

Dimana :

- t = waktu konsolidasi
- T_v = faktor waktu
- C_v = koefisien vertikal (cm^2/s atau m^2/s)
- Hdr = panjang aliran air drainage di dalam tanah (m)

2.4.4. Parameter Tanah untuk Menghitung Waktu Pemampatan Konsolidasi

a. Faktor Waktu

Faktor waktu T_v adalah merupakan fungsi langsung dari derajat konsolidasi (U%) dan bentuk dari distribusi tegangan air pori (u) di dalam tanah (aliran satu arah atau dua arah). Apabila distribusi tegangan air porinya merata (homogen) maka hubungan T_v dan U adalah (Tabel 2.3)

Tabel 2. 3 Korelasi antara T_v dan U

U(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T_v	0,008	0,031	0,071	0,126	0,197	0,287	0,403	0,567	0,848	∞

Sumber : Jurnal Alfin Kafia Rahman, Perencanaan Perbaikan Tanah (2015)

b. Koefisien Konsolidasi Vertikal (C_v)

Koefisien konsolidasi vertikal C_v diperoleh dari grafik korelasi antara besarnya pemampatan tanah dengan waktu (t). Berikut adalah persamaan yang dipakai:

$$C_v = \frac{0,197 (Hx2)^2}{t_{50}} \quad (2.18)$$

Apabila lapisan tanahnya heterogen dan mempunyai beberapa nilai C_v , maka harga C_v yang dipakai adalah nilai C_v gabungan (ABSI,1965)

$$C_{vgab} = \frac{(H_1+H_2+\dots+H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}}\right)^2} \quad (2.19)$$

dimana:

- h_i = tebal lapisan i
- C_{vi} = Harga C_v lapisan i

c. Panjang aliran drainage H (H_{dr})

Apabila tebal lapisan lempung (compressible soil) kita sebut H, maka panjang aliran drainage Hdr adalah :

$H_{dr} = \frac{1}{2} H$, bila arah aliran air selama proses konsolidasi adalah dua arah (ke atas dan ke bawah)

$H_{dr} = H$, bila arah aliran drainage-nya satu arah (ke atas atau ke bawah). Hal ini terjadi bila di atas atau biasanya di bawah lapisan lempung tersebut merupakan lapisan yang kedap air (impermeable)

2.5. PENELITIAN TERDAHULU

Penelitian yang dilakukan ini tidak terlepas dari penelitian-penelitian terdahulu yang dapat menjadi rujukan dalam penulisan dan penyelesaian masalah pada penelitian ini. Penelitian terdahulu digunakan sebagai dasar karena memiliki keterkaitan dengan metode percepatan konsolidasi tanah lunak menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), analisis waktu konsolidasi, serta penerapannya pada konstruksi di atas tanah lunak. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan dasar penelitian adalah sebagai berikut:

Zhafirah & Amalia (2019) menunjukkan bahwa penggunaan PVD yang dikombinasikan dengan metode *preloading* mampu mempercepat waktu konsolidasi tanah lunak dari puluhan tahun menjadi sekitar 11 minggu pada proyek Jalan Tol Pejagan–Pemalang. Penelitian ini dijadikan dasar karena membuktikan bahwa metode PVD efektif digunakan untuk mempercepat konsolidasi tanah lunak sehingga dapat meningkatkan efisiensi waktu pelaksanaan konstruksi.

Lumban Gaol & Panjaitan (2020) menyimpulkan bahwa tanah lempung lunak dapat mencapai derajat konsolidasi sebesar 95% hanya dalam waktu 23 hari dengan penerapan PVD. Penelitian ini menjadi dasar karena menunjukkan bahwa pemasangan PVD berpengaruh signifikan terhadap percepatan disipasi tekanan air pori dan waktu konsolidasi tanah lunak.

Jesayanto Jaya (2023) menekankan pentingnya struktur *breakwater* dalam perlindungan wilayah pesisir dengan desain yang mempertimbangkan kondisi tanah dasar. Penelitian ini dijadikan dasar karena menunjukkan bahwa kondisi tanah lunak pada area pesisir sangat mempengaruhi kestabilan konstruksi *breakwater* sehingga diperlukan metode perbaikan tanah yang tepat untuk mengurangi risiko penurunan tanah dan meningkatkan stabilitas struktur. Penelitian-penelitian di atas menjadi dasar dalam mendesain dan menganalisis efektivitas penggunaan PVD dalam pembangunan struktur *breakwater* pada tanah lunak seperti di Lamongan *Shorebase*.

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) yang dikombinasikan dengan *preloading* mampu mempercepat proses konsolidasi tanah lunak secara signifikan. Hal tersebut sejalan dengan penelitian ini, dimana penggunaan PVD pada tanah lunak di kawasan Lamongan *Shorebase* direncanakan untuk mempercepat disipasi tekanan air pori dan mencapai target derajat konsolidasi sebesar 90% dalam waktu maksimum 60 minggu. Selain itu, penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa konfigurasi pemasangan PVD, seperti pola dan jarak antar drain, mempengaruhi efektivitas percepatan konsolidasi. Oleh karena itu, penelitian ini turut menganalisis variasi pola dan spasi PVD untuk memperoleh konfigurasi yang paling efektif terhadap percepatan penurunan tanah pada konstruksi *breakwater*.