

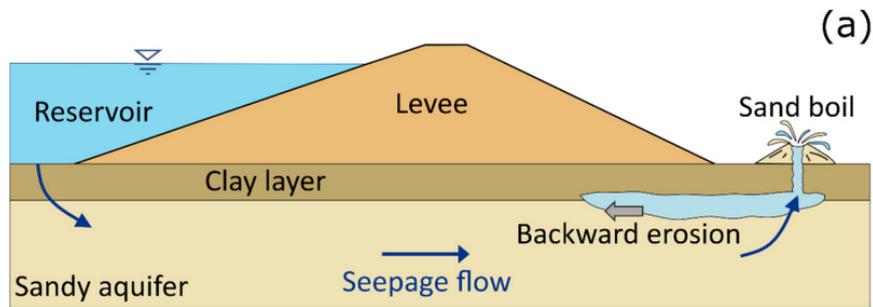
BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Fenomena *sand boiling* (semburan pasir) adalah fenomena geoteknik yang ditandai dengan semburan air dan pasir dari dalam tanah ke permukaan. Menurut Ishikawa & Yasuda (2012), fenomena *sand boiling* biasanya terjadi pada pasir seragam dan merupakan pasir halus yang tidak plastis. Fenomena ini sering terjadi pada konstruksi tanggul, bendungan, *cofferdam* atau proyek-proyek yang melibatkan penggalian di bawah permukaan air. Fenomena *sand boiling* menjadi tanda awal kegagalan struktur tanggul akibat erosi internal yang melemahkan fondasi tanggul (Kuchi dkk., 2019; Ojha dkk., 2003). Pada saat terjadi banjir air merembes ke bawah tanggul, jika kemiringannya cukup tinggi maka *sand boiling* dapat terjadi (Holtz et al., 2023; Jazayeri et al., 2023). *Sand boiling* sering terbentuk di hilir tanggul selama peristiwa banjir (Robbins dkk., 2020). *Sand Boiling* terlihat seperti gunung lumpur kecil yang terbentuk dari semburan air dan pasir (Aloisi dkk., 2004; Ghorbani dkk., 2024; Revil, 2002).

Gambar 1.1 menunjukkan sebuah penampang melintang dari sebuah tanggul (*levee*) yang dibangun di atas suatu akuifer berpasir. Tanggul ini umumnya digunakan untuk menahan luapan air dari *reservoir* (waduk) di belakangnya. Waduk adalah tempat penampungan air yang sengaja dibuat. Tanggul (*Levee*) berfungsi untuk menahan luapan air dari reservoir. Akuifer Pasir (*Sandy aquifer*) adalah lapisan tanah berpasir yang mengandung air tanah. Lapisan lempung (*Clay layer*) adalah lapisan tanah liat yang berfungsi sebagai lapisan kedap air, mencegah air dari reservoir meresap terlalu cepat ke dalam akuifer. Dari **Gambar 1.1** terlihat bahwa air dari reservoir memberikan tekanan pada lapisan tanah di bawah tanggul. Air meresap melalui lapisan tanah yang kurang rapat (seperti pasir), membentuk aliran rembesan (*seepage flow*). Aliran rembesan ini dapat menyebabkan erosi

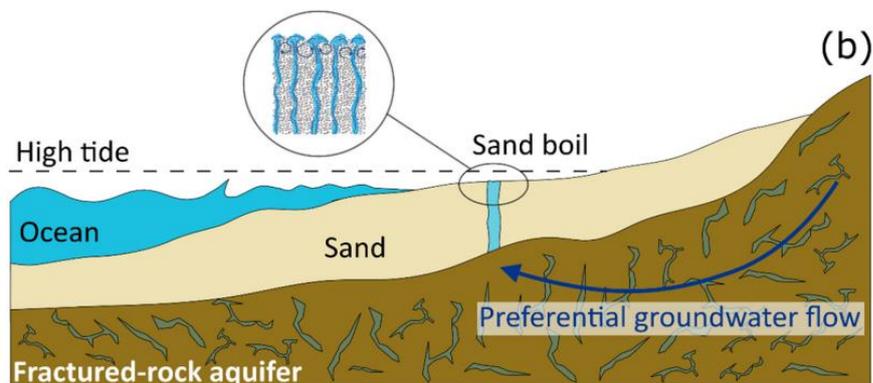
pada bagian bawah tanggul (*backward erosion*). Jika tekanan air semakin tinggi, dapat terjadi *sand boiling*.



Gambar 1.1 Terjadinya Sand Boiling di Bawah Tanggul (Jazayeri et al., 2023)

Dampak dan bahaya dari *sand boiling* pada tanggul adalah dapat menyebabkan kegagalan tanggul dimana jika proses erosi terus berlanjut, tanggul dapat runtuh dan menyebabkan banjir. Bahaya lain adalah kerusakan infrastruktur seperti bangunan, jalan, dan infrastruktur lainnya. Kerugian ekonomi yang besar akibat kerusakan yang terjadi dan terganggunya aktivitas masyarakat.

Gambar 1.2 menunjukkan terjadinya *sand boiling* pada zona intertidal (zona pasang surut) di sungai Mississippi (AS), di pantai Plage de Vaiva (Tahiti) dan pantai Ngobaran (Indonesia) terjadi *sand boiling* yang disebabkan keluarnya air tanah bawah laut ke bibir pantai (Jazayeri dkk., 2023).



Gambar 1.2 Terjadinya Sand Boiling pada Zona Intertidal (Jazayeri et al., 2023)

Proses terbentuknya *sand boiling* di daerah pasang surut (*zona intertidal*) terjadi akibat interaksi antara air laut, pasir, dan akuifer batuan retak yang berada di bawah permukaan tanah. Zona Intertidal adalah wilayah peralihan antara daratan dan lautan yang secara teratur terendam dan terkena udara saat terjadi pasang surut. Pada **Gambar 1.2** terlihat bahwa pada lapisan pasir terdapat akuifer yang terbentuk dari batuan retak-retak. Akuifer ini berfungsi sebagai tempat penyimpanan dan aliran air tanah. Aliran air tanah dari akuifer batuan retak cenderung mengalir melalui retakan-retakan batuan. Aliran ini disebut sebagai aliran air tanah preferensial. Saat air laut pasang, tekanan air akan meningkat dan mendorong air masuk ke dalam lapisan pasir dan mencapai akuifer. Tekanan air yang meningkat di dalam akuifer akan mencari jalan keluar melalui titik lemah pada lapisan pasir. Ketika air dan pasir menemukan celah, akan terjadi *sand boiling*.

Dampak *sand boiling* pada zona intertidal adalah terjadinya erosi pantai dimana semburan pasir dapat menyebabkan erosi pada garis pantai. Dampak lainnya adalah terjadinya kerusakan infrastruktur serta kontaminasi air tanah dimana jika air laut yang masuk ke dalam akuifer mengandung polutan, dapat menyebabkan kontaminasi air tanah.

Sand boiling juga dapat terjadi pada *cofferdam* yang sedang dalam proses konstruksi. *Cofferdam* adalah struktur sementara yang dibangun untuk mengeringkan area kerja di bawah permukaan air, biasanya untuk keperluan konstruksi. Fenomena *sand boiling* ini ditandai dengan munculnya semburan air dan pasir dari dasar *cofferdam* ke permukaan, yang dapat mengganggu proses konstruksi dan bahkan menyebabkan kegagalan struktur. Proses terjadinya *sand boiling* pada *cofferdam* adalah karena adanya perbedaan tekanan yang terjadi ketika air dipompa keluar dari dalam *cofferdam* untuk mengeringkan area kerja, akan terjadi perbedaan tekanan antara air di dalam *cofferdam* dan air di luar *cofferdam*. Perbedaan tekanan ini menyebabkan air tanah di luar *cofferdam* mengalir ke dalam *cofferdam* melalui pori-pori tanah atau retakan pada lapisan kedap air.

Aliran air yang masuk ke dalam *cofferdam* akan mengerosi butiran-butiran tanah, terutama pada lapisan pasir yang lebih mudah tererosi. Proses erosi akan membentuk rongga-rongga di bawah dasar *cofferdam*. Ketika rongga-rongga tersebut semakin besar, tekanan air akan meningkat dan menyebabkan *sand boiling* dan pasir keluar dari dasar *cofferdam*.

Dampak *sand boiling* pada konstruksi *cofferdam* adalah menghambat pekerjaan konstruksi dan menyebabkan kerusakan pada peralatan. Dalam beberapa kasus, *sand boiling* dapat menyebabkan kegagalan struktur *cofferdam* dan membahayakan pekerja. Untuk mengatasi masalah *sand boiling*, diperlukan tindakan tambahan seperti penambahan sistem drainase atau penggantian lapisan kedap air, yang akan meningkatkan biaya konstruksi. *Sand boiling* adalah fenomena yang perlu diperhatikan dalam konstruksi *cofferdam*.

Melihat dampak negatif *sand boiling* dan melihat risiko terjadinya *sand boiling* yang semakin meningkat, oleh karena itu diperlukan pemahaman yang lebih mendalam tentang fenomena ini untuk dapat merancang struktur yang aman dan tahan terhadap *sand boiling*. *Sand boiling* dapat terjadi akibat rembesan air ke atas. Faktor-faktor yang mempengaruhi rembesan ke atas adalah: (1) gradien hidrolis yang tinggi (Alabi et al., 2019; Werner et al., 2016) dimana semakin besar gradien hidrolis negatif, semakin besar potensi terjadinya rembesan ke atas; (2) permeabilitas tanah dimana tanah dengan permeabilitas tinggi seperti pasir dan kerikil akan lebih mudah dilalui oleh air sehingga potensi terjadinya rembesan ke atas lebih besar; (3) ketebalan lapisan tanah dimana lapisan tanah yang tebal dengan permeabilitas rendah dapat menahan rembesan air ke atas; (4) adanya lapisan kedap air di bawah lapisan tanah permeabel dapat menyebabkan air terjebak dan meningkatkan tekanan air sehingga mendorong air merembes ke atas.

Rembesan ke atas dapat menyebabkan terjadinya erosi internal, hal ini ditunjukkan oleh hilangnya partikel halus yang menyebabkan perubahan rasio rongga dan peningkatan permeabilitas yang mengakibatkan penurunan kekuatan tanah (Ke & Takahashi, 2012). Gaya gravitasi, gaya apung dan interaksi antara fluida-partikel dapat juga digunakan untuk memperkirakan kecepatan partikel pasir yang mengalami rembesan ke atas (Fujisawa dkk., 2013). Distribusi ukuran partikel dan gradien hidrolik kritis memiliki dampak yang signifikan terhadap ketidakstabilan internal tanah (Liang dkk., 2017).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk memprediksi gradien hidrolik kritis (i_{cr}) yang umumnya digunakan untuk menentukan terjadinya *sand boiling* (Yang & Wang, 2017). *Sand boiling* terjadi setelah mencapai gradien hidrolik kritis (Kawajiri dkk., 2024). Beberapa peneliti sudah banyak melakukan model eksperimental laboratorium uji kolom pasir dengan rembesan ke atas untuk mengetahui fenomena *sand boiling*. Setiap uji model memiliki kelebihan dan kekurangannya, tergantung pada seberapa realistis simulasi kondisi lapangan dan seberapa rinci data yang dihasilkan. Metode eksperimental laboratorium dengan uji model skala kecil dapat mensimulasikan kondisi nyata dimana likuifaksi dan *sand boiling* dapat terjadi. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada pembuatan model untuk mensimulasikan fenomena likuifaksi yang diindikasikan dengan *sand boiling* akibat gempa, namun mengabaikan fenomena *sand boiling* akibat rembesan air ke atas tanpa beban gempa (getaran). Berdasarkan hal tersebut maka pembuatan model eksperimental adalah langkah krusial untuk memahami fenomena *sand boiling*. Temuan dari eksperimen ini tidak hanya memberikan wawasan fundamental tetapi juga membantu merancang langkah mitigasi untuk mengurangi risiko fenomena *sand boiling* akibat rembesan air ke atas pada pasir berlapis (tanpa beban gempa atau tanpa getaran).

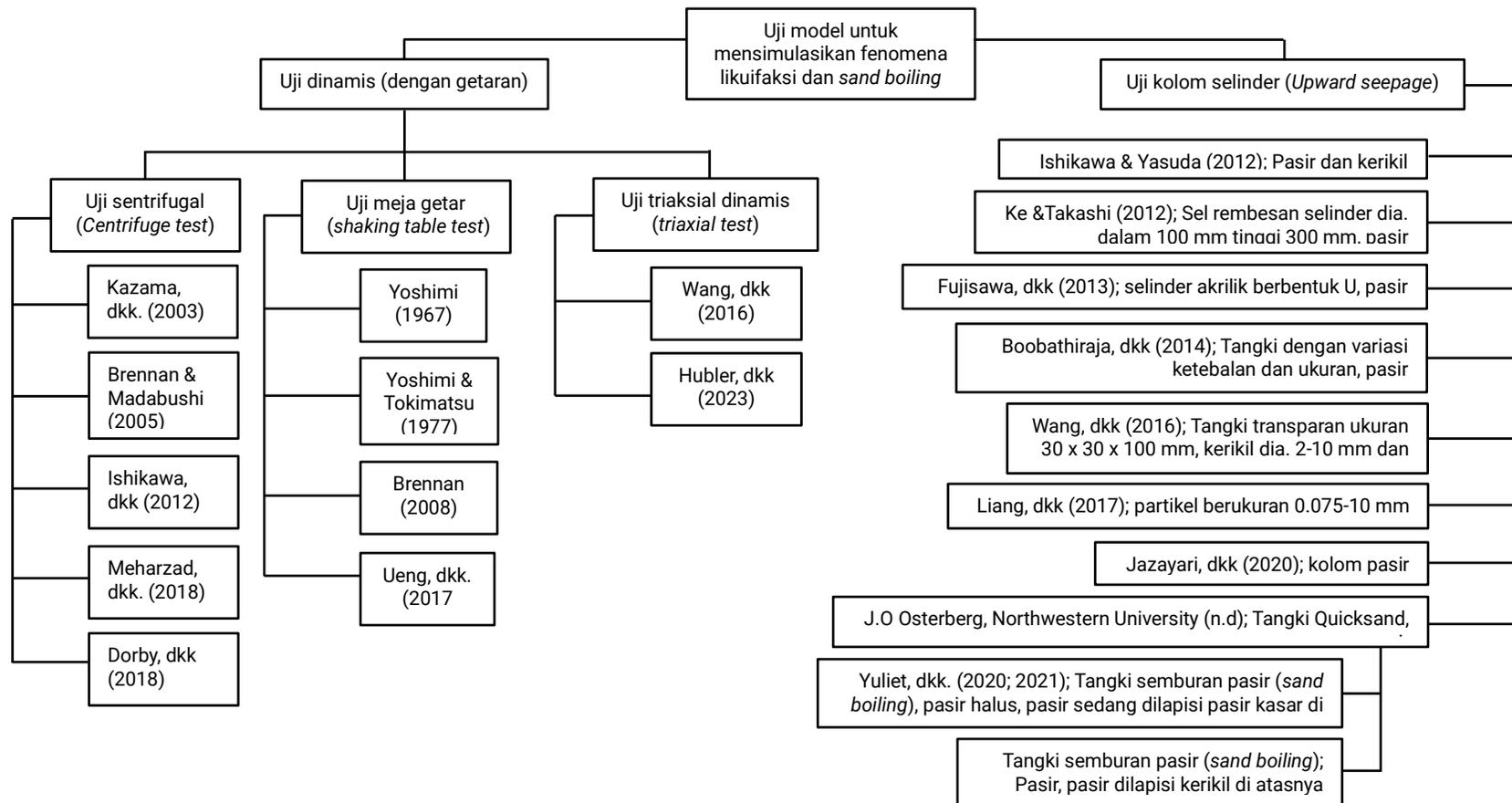
1.2. Masalah Penelitian

Model eksperimental laboratorium untuk menguji fenomena *sand boiling* dan likuifaksi pada pasir jenuh mencakup berbagai uji model. Uji model dengan meja getar, alat sentrifugal dan triaksial dinamis biasanya digunakan untuk mensimulasikan fenomena likuifaksi pada pasir dan kerikil jenuh akibat gempa bumi. Uji model dengan meja getar telah dilakukan oleh banyak peneliti seperti: (Brennan & Madabhushi, 2005; Ueng dkk., 2017; Yoshimi, 1967; Yoshimi & Tokimatsu, 1977).

Uji model dengan alat sentrifugal juga sudah banyak dilakukan oleh peneliti seperti: (Brennan & Madabhushi, 2005; Dobry dkk., 2018; Ishikawa & Yasuda, 2012; Mehrzad dkk., 2018; Sento dkk., 2004). Uji model dengan alat triaksial dinamis telah dilakukan oleh (Wang dkk., 2020).

Uji model triaksial dinamis adalah salah satu uji model yang paling sering digunakan untuk menguji potensi likuifaksi. Hubler dkk. (2023) melakukan uji geser sederhana siklik volume konstan pada tanah kerikil. Uji model triaksial dinamis menggunakan alat triaksial dengan menerapkan tekanan lateral dan siklis (seperti gempa) pada sampel tanah. Uji ini digunakan untuk mengukur kekuatan geser tanah dan tekanan air pori selama proses getaran.

Uji model eksperimental yang biasa digunakan untuk mensimulasikan fenomena *sand boiling* pada pasir jenuh adalah uji model kolom selinder dengan rembesan air ke atas. Beberapa peneliti yang telah melakukan uji model kolom pasir seperti (Boobathiraja dkk., 2014; Fujisawa dkk., 2013; Ishikawa & Yasuda, 2012; Jazayeri dkk., 2023; Ke & Takahashi, 2012; Liang dkk., 2017; Yuliet dkk., 2018, 2021). J. O Osterberg, Northwestern University (n.d) dalam Holtz dkk. (2023), membuat sebuah tangki *quicksand* yang digunakan untuk memodelkan *sand boiling* dan likuifaksi. Tinjauan literatur yang menyajikan perkembangan terbaru dan pemahaman peneliti terdahulu tentang masalah dalam penelitian ini (*state of the Art*) dapat dilihat pada **Gambar 1.3**.



Gambar 1.3 State of the Art

Dari beberapa penelitian tersebut belum ditemukan secara jelas perbedaan antara *sand boiling* akibat getaran (gempa) dengan *sand boiling* akibat rembesan air ke atas tanpa getaran (tanpa beban gempa) pada pasir berlapis. Berdasarkan permasalahan tersebut peneliti mencoba mengembangkan suatu **model eksperimental fenomena *sand boiling* pada pasir berlapis** untuk mencari kebaruan (*novelty*) terkait dengan *sand boiling* akibat rembesan air ke atas tanpa getaran.

Kebaruan yang peneliti lakukan adalah membuat model eksperimental metode kolom pasir dengan rembesan air ke atas berupa tangki berukuran 103 cm x 15 cm x 61 cm dari bahan akrilik yang diisi dengan pasir sangat lepas jenuh air. Uji pendahuluan telah dilakukan dengan mengisi tangki dengan fraksi pasir yaitu fraksi halus (lolos ayakan no. 4 tertahan di ayakan no. 10), fraksi sedang (lolos ayakan no. 10 tertahan di ayakan no. 40) dan fraksi kasar (lolos ayakan no. 40 tertahan di ayakan no. 200), dengan debit aliran persatuan waktu (q) yang sangat kecil (Yuliet dkk., 2020, 2021).

Pada penelitian lanjutan, material yang digunakan adalah pasir asli bergradasi buruk (SP) dengan kerapatan relatif (D_r) sangat lepas. Ada tiga skenario yang diuji dengan variasi debit aliran dan variasi lapisan pasir dan kerikil. Untuk skenario ke-1 terdiri dari satu lapis pasir asli dengan debit persatuan waktu (q) = 25 Liter Per Menit (LPM). Untuk skenario ke-2 terdiri dari satu lapis pasir asli dengan q = 45 LPM. Untuk skenario ke-3 terdiri dari 2 lapis dimana lapisan pasir asli berada di bawah lapisan kerikil dengan q = 45 LPM. Dari pengukuran tinggi tekanan (*pressure head*) akan didapatkan variasi kehilangan tinggi tekanan (*head loss*), variasi tekanan air pori berlebih (*Excess Pore Water Pressure, EPWP*). Berdasarkan nilai EPWP tersebut didapatkan variasi tegangan efektif (σ') terhadap kedalaman akibat rembesan ke atas. Dari variasi tegangan efektif terhadap kedalaman akan didapatkan zona dimana *sand boiling* terjadi dan hasilnya akan dibandingkan dengan hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh Ueng dkk. (2017).

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan umum (*primary objective*) dari penelitian ini adalah:

Mengembangkan model fisik untuk membuktikan bahwa rembesan air ke atas adalah fenomena semburan pasir (*sand boiling*).

Tujuan khusus (*secondary objective*) dari penelitian ini adalah:

1. Mencari hubungan antara variasi tekanan air pori berlebih (EPWP), tekanan hidrostatik (u), tegangan total (σ) dan tegangan efektif (σ') terhadap kedalaman (h).
2. Menganalisis *sand boiling* pada pasir berlapis akibat rembesan air ke atas tanpa getaran berdasarkan nilai tegangan efektif nol ($\sigma'=0$).
3. Menganalisis pengaruh pelapisan pasir dengan kerikil di atasnya terhadap kedalaman zona terjadinya *sand boiling* akibat rembesan air ke atas tanpa getaran.
4. Menganalisis potensi terjadinya *sand boiling* pada pasir berlapis akibat rembesan ke atas berdasarkan hubungan antara gradien hidrolis (i) terhadap gradien hidrolis kritis (i_{cr}).
5. Menganalisis potensi terjadinya *sand boiling* pada pasir berlapis akibat rembesan ke atas berdasarkan hubungan antara kecepatan aliran (v) terhadap kecepatan rembesan (v_s).
6. Menganalisis potensi terjadinya *sand boiling* pada pasir berlapis akibat rembesan ke atas berdasarkan gaya efektif (P_1') terhadap gaya rembes ($P_1'-P_2'$).

1.4. Kontribusi Bagi Ilmu Pengetahuan

Model eksperimental laboratorium dengan metode uji kolom pasir menggunakan tangki dari bahan akrilik berukuran 103 cm x 15 cm x 61 cm dengan rembesan air ke atas pada pasir berlapis tanpa getaran memberikan kontribusi yaitu:

1. Model eksperimental ini membantu menjelaskan bagaimana tekanan air pori yang meningkat dapat menyebabkan hilangnya kekuatan tanah. Hal ini relevan dalam memahami fenomena *sand boiling* pada pasir berlapis di lapangan.
2. Penelitian ini dapat memberikan data untuk memperkuat teori tentang hubungan antara kecepatan rembesan (*seepage velocity*) dan gradien hidraulik kritis.
3. Salah satu hasil penting adalah penentuan gradien hidrolis kritis, yaitu nilai gradien hidrolis di mana gaya angkat air melampaui berat butiran tanah sehingga terjadi *sand boiling*. Data ini relevan untuk desain stabilitas fondasi dan pengelolaan bendungan atau tanggul.
4. Uji model eksperimental laboratorium dapat digunakan untuk memvalidasi model matematis dan numerik yang menjelaskan perilaku tanah jenuh di bawah kondisi rembesan. Ini memperkuat pendekatan analitis dan numerik dalam desain geoteknik.
5. Fenomena *sand boiling* sering terjadi pada proyek yang melibatkan tanah jenuh, seperti pembangunan bendungan, tanggul, atau terowongan bawah air. Uji ini memberikan wawasan langsung yang dapat digunakan untuk memitigasi kegagalan struktur.
6. Uji ini memberikan informasi penting untuk mengidentifikasi kondisi kritis yang memicu keruntuhan tanah akibat fenomena *sand boiling* akibat rembesan air ke atas. Hal ini dapat membantu dalam manajemen risiko dan mitigasi bencana, terutama di daerah rawan banjir.
7. Hasil uji juga dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi efisiensi teknik stabilisasi tanah, seperti penggunaan *grouting* atau *geotextile*, dalam mencegah fenomena *sand boiling*.
8. Data yang diperoleh dari uji laboratorium berperan penting dalam pengembangan database properti tanah dan perilakunya di bawah kondisi rembesan, yang dapat digunakan dalam studi-studi geoteknik lanjutan.

Dengan kontribusi-kontribusi ini, model eksperimental di laboratorium pada pasir berlapis dengan rembesan air ke atas menjadi landasan penting untuk mengintegrasikan pengetahuan eksperimental dan teori dalam pengembangan solusi geoteknik yang lebih andal.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah:

1. Dapat direkomendasikan sebagai salah satu model yang bisa digunakan untuk mengetahui potensi terjadinya *sand boiling* pada pasir berlapis akibat rembesan air ke atas tanpa getaran yang terjadi di lapangan.
2. Data yang diperoleh dari uji model memberikan wawasan berharga untuk perancangan dan pelaksanaan proyek di area yang berpotensi mengalami *sand boiling* pada pasir berlapis akibat rembesan air ke atas tanpa getaran.
3. Penelitian ini membantu dalam memprediksi kedalaman zone terjadinya *sand boiling* pada pasir berlapis sehingga dapat diketahui potensi risiko serta dapat merancang strategi mitigasi, dan memastikan stabilitas tanah dan struktur tanggul, dll.

