

BAB IV

ANALISIS HASIL PENELITIAN

4.1. Hasil Pengujian Karakteristik Fisik

Rangkaian pengujian ini dilakukan di Laboratorium Geoteknik PT. Indra Karya, Malang. Dari hasil pengujian di Laboratorium, diperoleh hasil karakteristik tanahnya sebagai berikut :

4.1.1. Analisis Pembagian Butiran

Dalam penelitian ini, analisis pembagian butiran tanah menggunakan dua metode analisis yaitu: analisis ayakan (*sieve analysis*) dan analisis hydrometer. Analisis ayakan digunakan untuk mengetahui diameter butiran tanah yang lebih besar dari 0,075 mm (tertahan pada ayakan no.200), sedangkan untuk tanah dengan diameter butiran yang lebih kecil dari 0,075 mm menggunakan analisis hydrometer. Berikut adalah hasil analisis pembagian butiran tanah dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah ini :

Tabel 4.1. Hasil analisis pembagian butiran tanah

No.	Prosentase <i>Bentonite</i> (%)	Kerikil (<i>Gravel</i>) (%)	Pasir (<i>Sand</i>) (%)	Lanau (<i>Silt</i>) (%)	Lempung (<i>Clay</i>) (%)
1	0	6.21	46.73	29.51	17.56
2	30	4.89	41.49	16.20	37.41
3	50	5.45	26.13	18.76	49.65
4	70	4.62	14.75	24.05	56.58
5	100	0.02	1.13	28.62	70.23

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari tabel 4.1 dapat ditarik kesimpulan bahwa penambahan prosentase *bentonite* ke dalam campuran tanah dapat menurunkan kadar kerikil di dalam campuran. Dengan bertambahnya prosentase *bentonite* ke dalam campuran tanah, kandungan kerikil berkurang sebesar 21% untuk campuran 70% tanah, 12% untuk campuran 50% tanah dan 25% untuk campuran 30% tanah. Penambahan prosentase *bentonite* juga menurunkan kadar pasir dalam campuran tanah. Kadar pasir berkurang sebanyak 11% untuk 70% campuran tanah, 44% untuk campuran 50% tanah dan 69% untuk campuran 30% tanah. Sedangkan penambahan kadar *bentonite* menyebabkan peningkatan kandungan lempung dalam campuran tanah. Kandungan lempung meningkat sebesar 28% untuk campuran 70% tanah, 46% untuk campuran 50% tanah, dan 56% untuk campuran 30% tanah.

Untuk data pengujian dan hasil perhitungan analisa butiran selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

Dari data yang diperoleh pada Tabel 4.1 dapat pula digambarkan grafik gabungan analisis pembagian butiran tanah seperti Gambar 4.1.

Dari Gambar 4.1 dapat ditarik kesimpulan bahwa yang memiliki nilai D_{10} hanya tanah asli 0,0017 mm, sedangkan pada tanah bentonite dan campuran tanah asli dengan bentonite tidak memiliki nilai D_{10} .

4.1.2. Batas-batas Atterberg Tanah

Tujuan dari pengujian batas-batas Atterberg ini adalah untuk menentukan kadar air suatu tanah pada keadaan batas plastis, batas cair, batas susut, dan indeks plastisitasnya. Hasil pengujian batas-batas Atterberg dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4.2. Hasil pengujian batas-batas atterberg

No.	Prosentase Bentonite (%)	Atterberg Limit			
		Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Shrinkage Limit (%)	Plasticity Index (%)
1	0	56.98	38.83	30.64	18.15
2	30	195.73	38.73	24.25	156.99
3	50	289.4	38.44	20.39	250.96
4	70	381.04	37.81	16.61	343.23
5	100	520.79	37.57	10.78	483.22

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.2, dapat diketahui bahwa *Bentonite* memiliki nilai *Liquid Limit* dan *Plasticity Index* yang jauh lebih besar dibandingkan dengan Tanah Asli, sehingga *Bentonite* memiliki plastisitas yang lebih tinggi. Tingginya nilai plastisitas pada *bentonite* disebabkan oleh kandungan mineral *montmorillonite* yang sangat tinggi, *montmorillonite* sehingga dapat menyerap air dengan sangat kuat, dan mudah mengalami proses pengembangan sehingga mempengaruhi nilai LL dan PI. Penambahan prosentase *Bentonite* menyebabkan nilai *Liquid Limit* dan *Plasticity Index* semakin meningkat. *Bentonite* meningkatkan plastisitas tanah lempung dengan mengikat lebih banyak partikel air untuk mengisi rongga-rongga tanah dalam membentuk campuran yang kepadat air.

Penambahan 30% *bentonite* meningkatkan nilai LL sebesar 27% dan nilai PI meningkat sebesar 29%, untuk penambahan 50% *bentonite* meningkatkan nilai LL sebesar 45% dan nilai PI sebesar 48%, sedangkan untuk penambahan 70% *bentonite* meningkatkan nilai LL sebesar 62% dan nilai PI sebesar 67%.

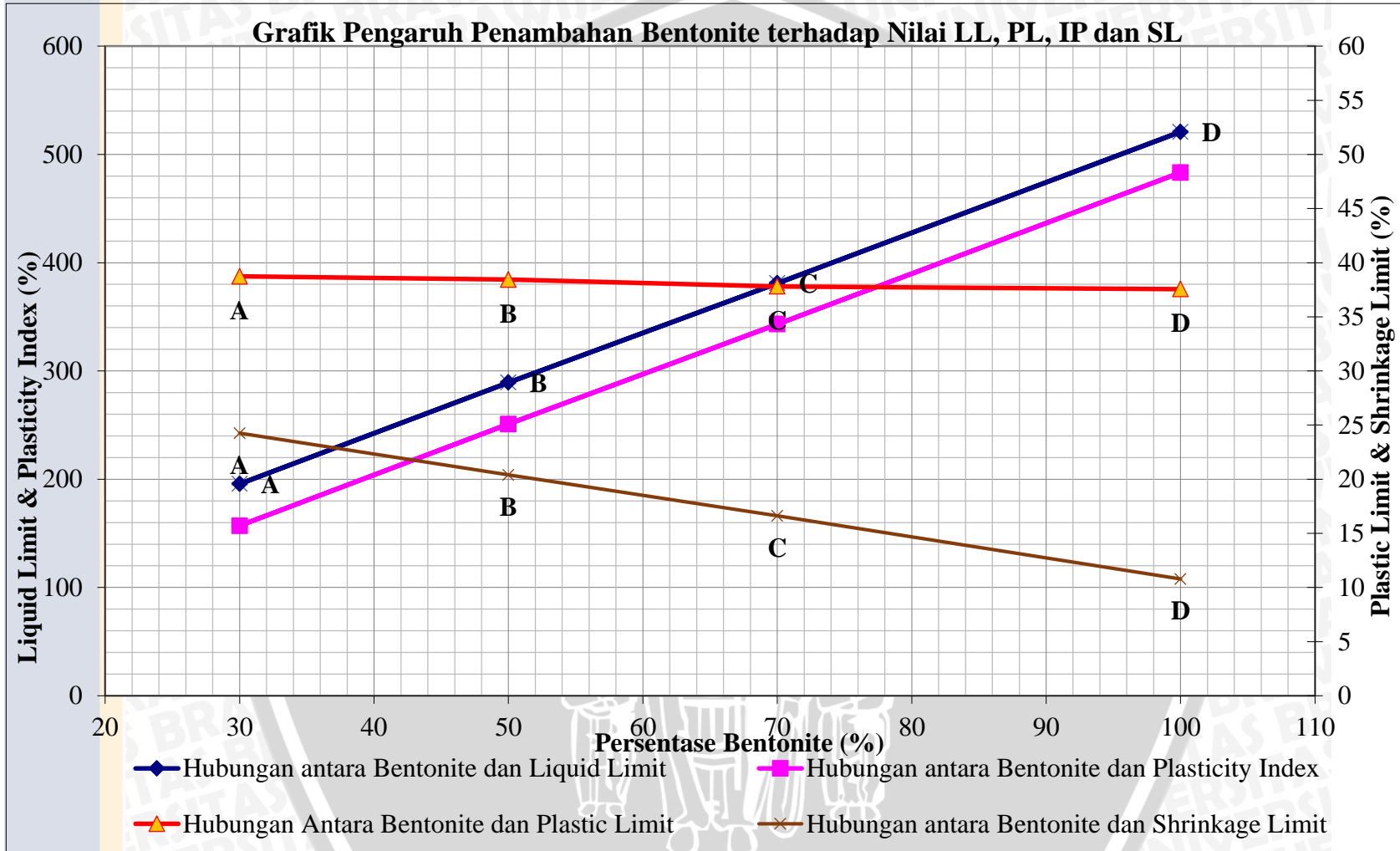
Semakin besar prosentase *bentonite* menyebabkan nilai *shrinkage limit* semakin menurun, hal ini menunjukkan bahwa *bentonite* memiliki penyusutan yang sangat besar. Dari karakteristik penyusutan tanah lempung *bentonite* yang sangat tinggi harus menjadi perhatian pada perencanaan suatu *Compacted Soil Liner (CSL)*. Pada penelitian ini, campuran antara tanah pasir kelanauan dan *bentonite* akan dipelajari lebih mendalam untuk mengetahui berbagai karakteristik fisik dari material tanah yang berpotensi sebagai CSL.

Karakteristik penyusutan pada tanah asli dan *bentonite* yang saling berlawanan ini bersifat saling melengkapi dalam kondisi basah maupun kering. Dalam kondisi basah, *bentonite* memiliki kemampuan pengembangan yang tinggi akibat dari daya ikat terhadap air yang sangat besar sehingga rongga-rongga dalam tanah dengan campuran *bentonite* dapat terisi dan menyebabkan campuran tanah kedap terhadap air.

Tanah dengan nilai *plasticity index* yang tinggi (>30%-40%) cenderung membentuk gumpalan yang keras ketika kondisi kering dan gumpalan yang sangat lengket ketika kondisi basah. Tanah dengan plastisitas tinggi juga cenderung cepat dalam hal penyusutan dan pengembangan ketika dikeringkan atau dibasahi.

Untuk data pengujian dan hasil perhitungan batas-batas atterberg selengkapnya dapat dilihat pada lampiran. Dari Tabel 4.2 dapat ditarik hubungan antara pengaruh kadar *Bentonite* pada pemodelan benda uji terhadap konsistensi tanah seperti Gambar 4.2 berikut ini.





Gambar 4.2. Grafik hubungan kadar *Bentonite* terhadap konsistensi tanah
 Sumber: Data

4.1.3. *Specific Gravity* (Gs)

Pengujian *Specific Gravity* (Gs) bertujuan untuk menentukan berat jenis suatu tanah. Tabel 4.3. berikut ini adalah rekapan dari hasil pengujian Gs:

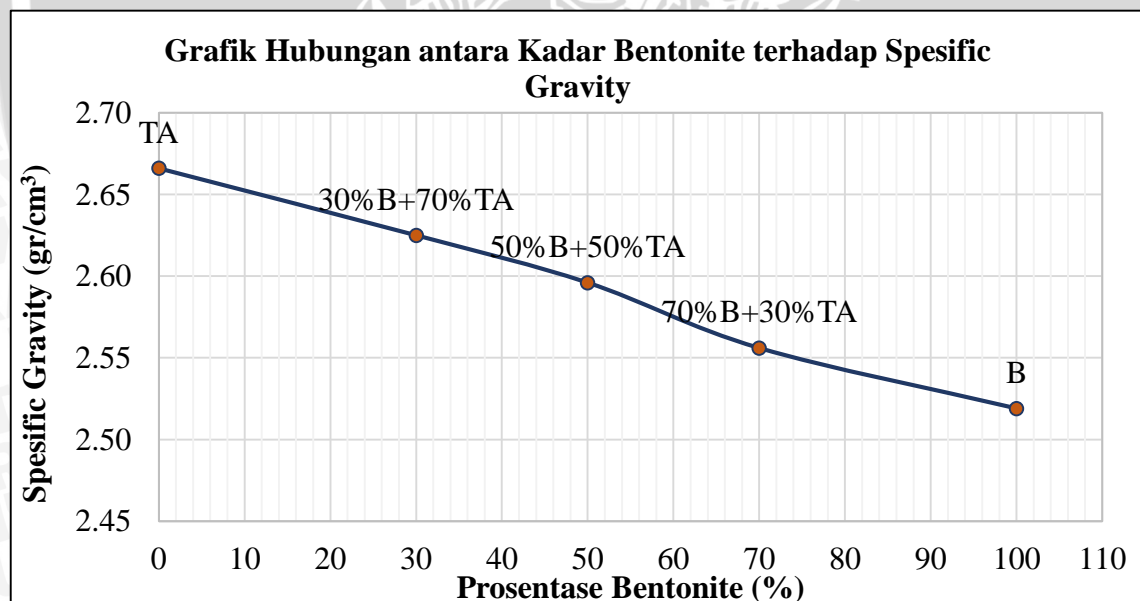
Tabel 4.3. Hasil pengujian *specific gravity* (Gs)

No.	Prosentase <i>Bentonite</i> (%)	<i>Specific Gravity</i> (gr/cm ³)
1	0	2.666
2	30	2.625
3	50	2.596
4	70	2.556
5	100	2.519

Sumber: Hasil Perhitungan

Untuk data pengujian dan hasil perhitungan *Specific Gravity* (Gs) selengkapnya dapat dilihat pada lampiran A.

Dari tabel 4.3 dapat ditarik hubungan antara pengaruh kadar *Bentonite* terhadap nilai *Specific gravity*, yang disajikan pada gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4.3. Hubungan antara Kadar *Bentonite* terhadap Nilai *Specific Gravity*
Sumber: Data

Dari gambar 4.3 di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin meningkatnya kadar *Bentonite*, nilai *Specific gravity* (Gs) semakin kecil. Hal ini berarti nilai *Specific gravity* (Gs) Tanah asli lebih besar dibandingkan *Bentonite*.

Shirazi et.,al, 2010 telah melakukan penelitian yang sama dan menghasilkan nilai *specific gravity bentonite* lebih besar dibandingkan Tanah. Hasil pengujian ini berlawanan dengan penelitian yang dilakukan oleh *Shirazi et.,al*, 2010 yang menyebutkan bahwa dengan penambahan *bentonite* dalam tanah akan meningkatkan nilai *specific gravity* pada campuran tanah. Perbedaan hasil pengujian *specific gravity* ini dimungkinkan terjadi karena perbedaan jenis *bentonite* yang digunakan.

4.1.4. Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah yang digunakan pada pengujian ini adalah sistem klasifikasi tanah AASHTO (*American Association of State Highway and Transporting Official*) dan *Unified Soil Clasification System (USCS)*. Kedua sistem ini sama-sama memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Berikut ini merupakan klasifikasi kedua tanah yang digunakan seperti Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 berikut ini :

Tabel 4.4. Klasifikasi tanah menurut standard USCS

Tanah	LL	PI	Simbol	Jenis Tanah
Bentonite	520,79	483,22	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi
Tanah Asli	56,98	18,15	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau
30%B+70%TA	195,73	156,99	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi
50%B+50%TA	289,40	250,96	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi
70%B+30%TA	381,04	343,23	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi

Sumber: Hasil analisis

Tabel 4.5. Klasifikasi tanah menurut standard AASTHO

Tanah	LL	PI	Simbol	Jenis Tanah
Bentonite	520.79	483.22	A-7-5	Lanau sampai Lempung dengan $PI \leq LL - 30$
Tanah Asli	56.98	18.15	A-7-5	Lanau sampai Lempung dengan $PI \leq LL - 30$
30%B+70%TA	195,73	156,99	A-7-5	Lanau sampai Lempung dengan $PI \leq LL - 30$
50%B+50%TA	289,40	250,96	A-7-5	Lanau sampai Lempung dengan $PI \leq LL - 30$
70%B+30%TA	381,04	343,23	A-7-5	Lanau sampai Lempung dengan $PI \leq LL - 30$

Sumber: Hasil analisis

Dari Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 dapat disimpulkan bahwa: *Bentonite* dan ketiga komposisi campuran tanah merupakan jenis tanah lempung dengan plastisitas tinggi yang memiliki daya dukung kurang baik sedangkan untuk tanah asli merupakan jenis tanah pasir berlanau (campuran antara kerikil-pasir dan lanau lempung) dengan plastisitas tinggi yang memiliki daya dukung juga kurang baik.

Untuk data pengujian selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

4.2. Potensi Pengembangan Tanah (*Swelling Potential Soil*)

Tanah mengembang atau disebut juga dengan *expansive soil*, adalah tanah yang memiliki ciri-ciri kembang susut yang besar, mengembang pada musim hujan dan menyusut pada musim kemarau. Proses pengembangan (*swelling*) dan penyusutan (*Shrinking*) tanah sebagian besar adalah akibat peristiwa kapiler atau perubahan kadar air pada tanah tersebut. Tanah-tanah yang banyak mengandung lempung mengalami perubahan volume ketika kadar air berubah. Pengurangan kadar air yang diikuti oleh kenaikan tegangan efektif menyebabkan volume tanah menyusut dan sebaliknya penambahan kadar air menyebabkan pengembangan.

Skempton mengemukakan rumus dari parameter aktivitas (A) sebagai berikut:

$$\text{Aktivitas (A)} : \frac{PI}{C-10} \quad (4.1)$$

Dimana: c : Presentase fraksi lempung < 0.002 mm
 $A > 1.25$: Tanah bersifat aktif dan ekspansif
 $0.75 > A < 1.25$: Tanah digolongkan normal
 $A < 0.75$: Tanah digolongkan tidak aktif

Chen (1975) berpendapat bahwa potensi mengembang tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga Chen membuat klasifikasi potensi pengembangan pada tanah lempung berdasarkan indeks plastisitas, seperti yang tercantum dalam Tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4.6. Kriteria pengembangan tanah berdasarkan PI

Plasticity Index (%)	Swelling Potential
0 – 15	Low
10 – 35	Medium
20 – 35	High
>35	Very High

Sumber: Chen, 1988 dalam Das, 1995

Berdasarkan hasil pengujian konsistensi tanah terhadap model benda uji yang telah dilakukan dan kriteria potensi mengembang pada Tabel 4.6 di atas maka didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 4.7. Klasifikasi potensial mengembang (*swelling potential*) pada model benda uji menurut Chen (1975)

No.	Prosentase <i>Bentonite</i> (%)	<i>Plasticity Index</i> (%)	<i>Swelling Potential</i>
1	0	18.15	<i>Medium</i>
2	30	156.99	<i>Very High</i>
3	50	250.96	<i>Very High</i>
4	70	343.23	<i>Very High</i>
5	100	483.22	<i>Very High</i>

Sumber: Hasil Analisis dan Data

Seed et. al (1962) juga mengembangkan grafik hubungan nilai aktivitas dan persentase butir tanah lempung yang lolos saringan 0,002 mm seperti diklasifikasikan seperti Tabel 4.8 yang diperoleh dari hasil pengamatan sejumlah tanah lempung *remolded* yang berbeda-beda, yaitu: *Bentonite*, *Illite*, *Kaolinite* dan pasir halus dimana contoh tanah-tanah tersebut dipadatkan 100% pada kadar air optimumnya dan menerima beban lpsi.

Tabel 4.8. Klasifikasi derajat ekspansif

Swelling Potential (%)	Swelling Degree
0 – 1.5	Low
1.5 – 5	Medium
5 – 25	High
>25	Very High

Sumber: Seed et al.1962 dalam Das, 1995

Dari hasil pengujian laboratorium diperoleh data-data seperti Tabel 4.9 di bawah ini :

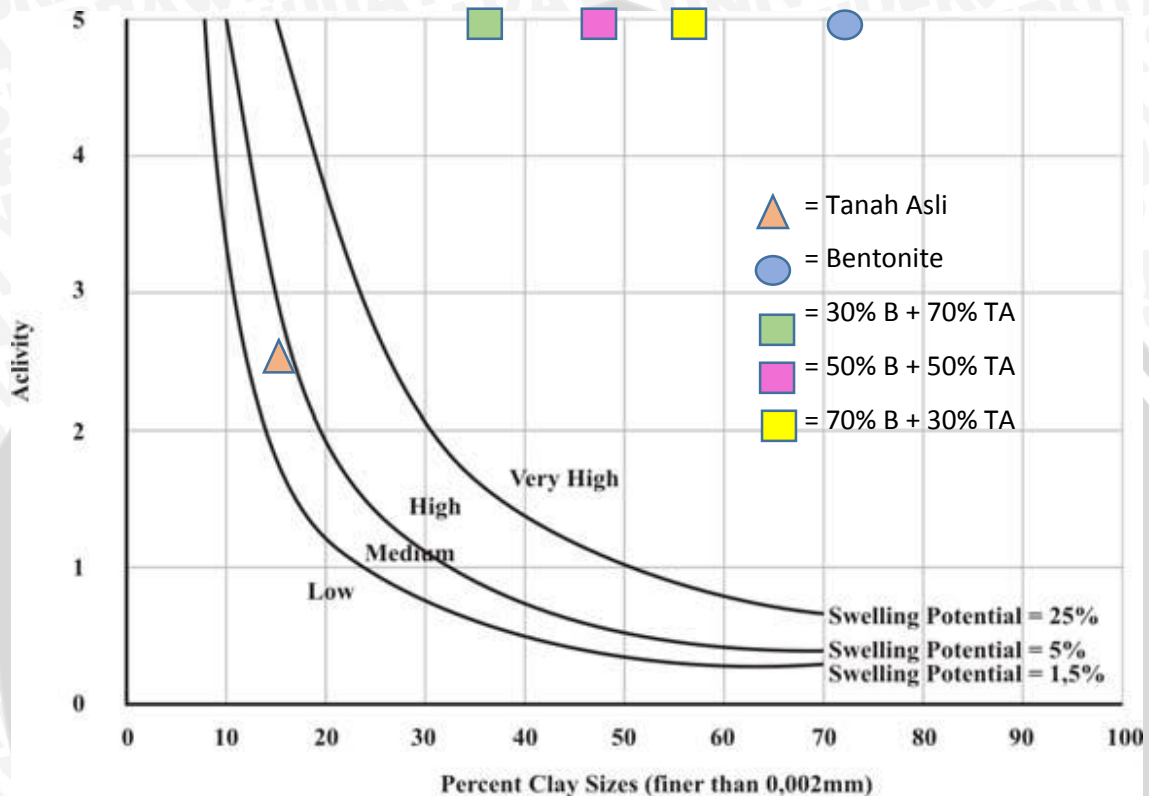
Tabel 4.9. Batas-batas atterberg, persen lempung, dan aktivitas

No.	Tanah	Batas Atterberg			Persen Lempung	Activity	Keterangan
		Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index			
1	0	56.98	38.83	18.15	17.56	2.40	Aktif
2	30	195.73	38.73	156.99	37.41	5.73	Aktif
3	50	289.40	38.44	250.96	49.65	6.33	Aktif
4	70	381.04	37.81	343.23	56.58	7.37	Aktif
5	100	520.79	37.57	483.22	66.51	8.55	Aktif

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan :
$$A = \frac{PI}{C-10}$$

Dari data-data pada Tabel 4.9 di atas, dapat ditentukan potensi mengembang (*Swelling Potential*) dari campuran kedua tanah yang digunakan dalam penelitian ini seperti pada Gambar 4.4.

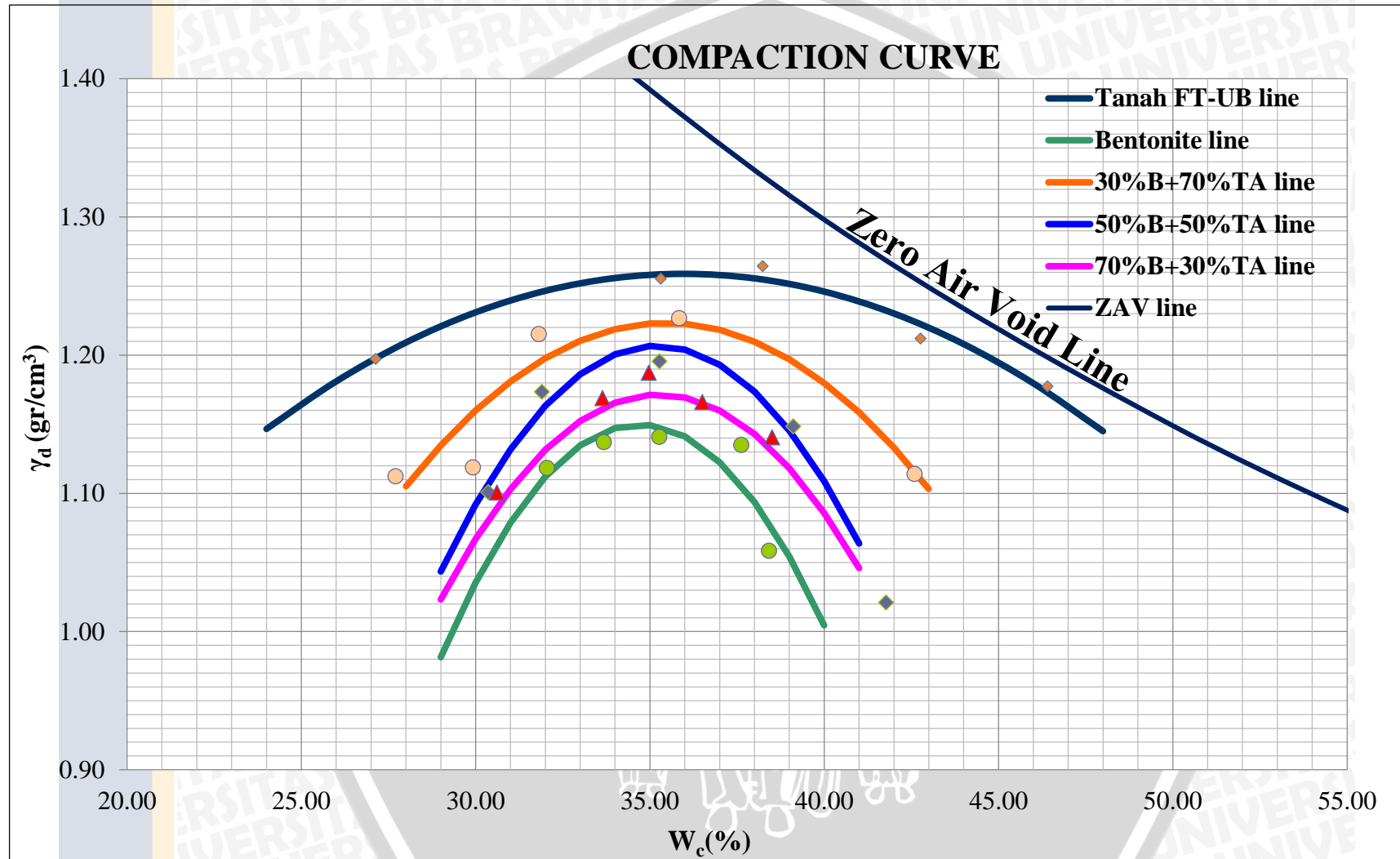


Gambar 4.4. Grafik klasifikasi potensi mengembang Tanah asli dan Bentonite
Sumber: Analisa dan data

Dari Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa untuk kedua tanah yang digunakan dalam penelitian ini memiliki potensi mengembang (*swelling potential*) yang berbeda-beda. Untuk tanah *Bentonite* dan ketiga campuran tanah termasuk dalam kategori sangat tinggi (*very high*) dan tergolong aktif dan ekspansif ($A > 1,25$), sedangkan tanah asli termasuk dalam kategori sedang (*medium*) dan tergolong aktif dan ekspansif ($A > 1,25$).

4.3. Hasil Pengujian Proctor

Pengujian *Proctor* juga dilakukan untuk menentukan karakteristik pemadatan dalam mencapai kepadatan di lapangan serta mengetahui kekuatan dan stabilitas tanah. Dari hasil pengujian pemadatan Standar Proctor pada penelitian ini, didapatkan kurva-kurva pemadatan (*compaction curves*) seperti pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5. Kurva pepadatan Tanah
Sumber: Data

Berdasarkan Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa, dengan meningkatnya prosentase *Bentonite*, nilai kadar air optimum (OMC) dan *Maximum dry density* (MDD) semakin menurun. Untuk lebih jelasnya, hasil rekapitulasi hasil pengujian *proctor* dapat dilihat pada Tabel 4.10 dibawah ini.

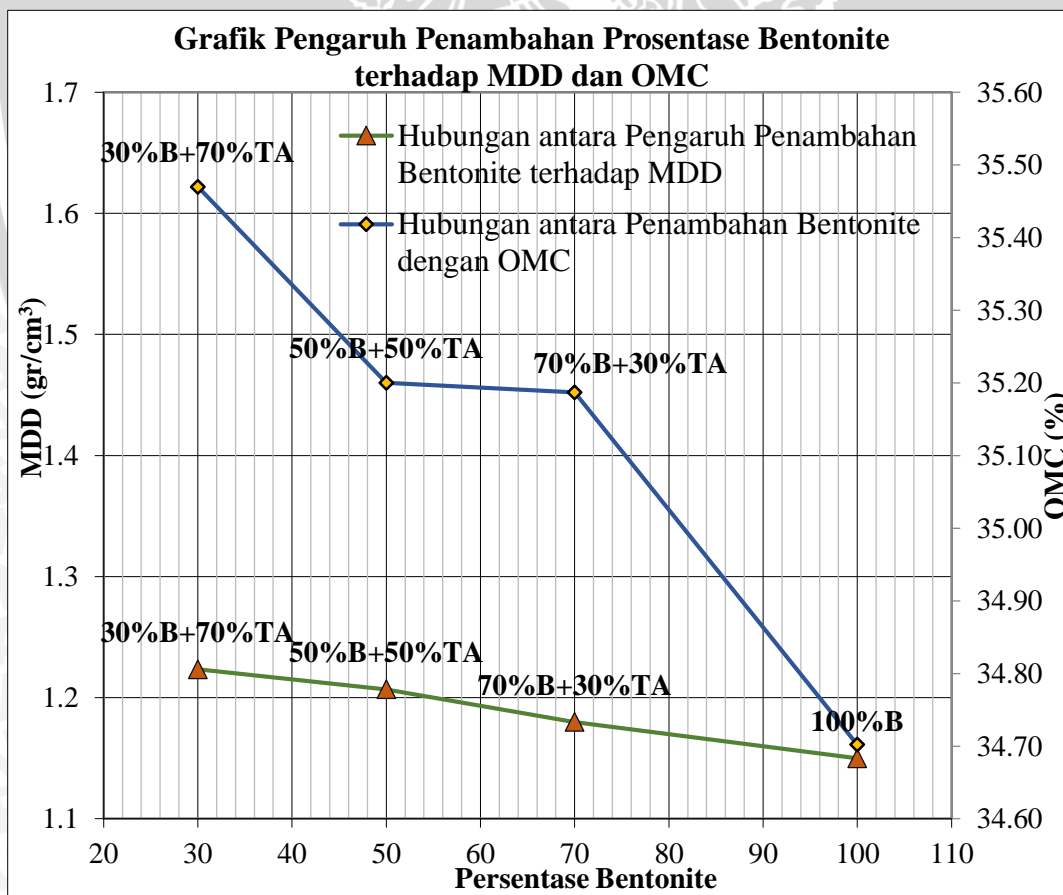
Tabel 4.10. Rekapitulasi hasil pengujian pemadatan

No.	Prosentase <i>Bentonite</i> (%)	MDD (gr/cm ³)	OMC (%)
1	0	1.259	35.96
2	30	1.223	35.47
3	50	1.207	35.20
4	70	1.180	35.19
5	100	1.150	34.70

Sumber: Hasil perhitungan

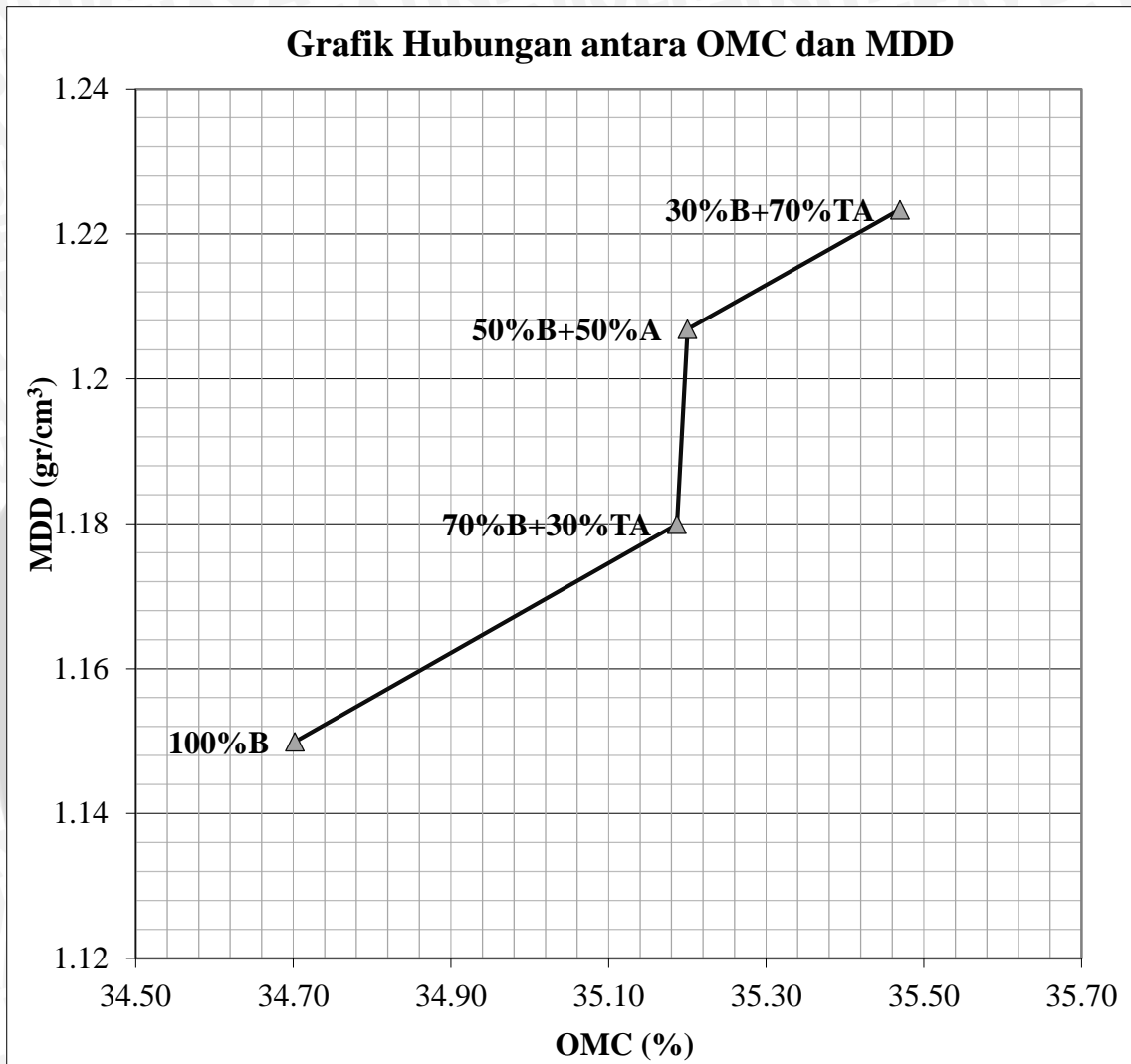
Hasil pengujian dari kurva pemadatan untuk masing-masing tanah tersebut selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran A.

Dari data yang diperoleh pada tabel 4.7 dapat ditarik hubungan antara OMC, MDD dan prosentase *Bentonite* seperti yang disajikan pada gambar 4.6 dan 4.7 berikut ini.



Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Penambahan Kadar Bentonite terhadap MDD dan OMC
Sumber: Data

Dari gambar 4.6 dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan bertambahnya prosentase *bentonite*, semakin menurunkan nilai OMC dan MDD. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Ameta dan Abhay, 2008 penambahan prosentase *bentonite* menyebabkan nilai OMC semakin meningkat.



Gambar 4.7. Grafik hubungan antara OMC dan MDD

Sumber: Data

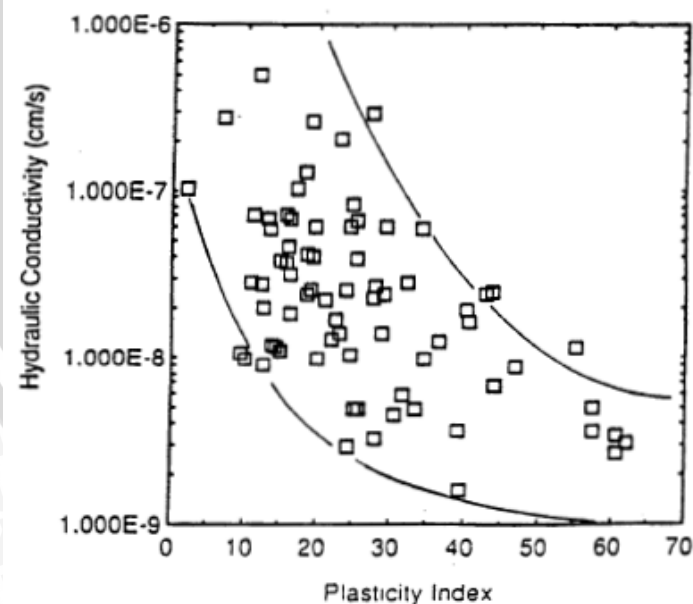
Dari gambar 4.7. dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi nilai OMC menyebabkan nilai MDD meningkat. Pada umumnya nilai OMC berbanding terbalik dengan nilai MDD, artinya semakin tinggi OMC, maka MDD akan menurun. Berbeda dengan hasil pengujian pada benda uji (Tanah Asli) pada pengujian ini, dengan OMC yang cukup tinggi untuk jenis tanah pasir kelanauan nilai MDD semakin besar pula. Hal ini terjadi karena OMC *bentonite* lebih kecil dibandingkan tanah asli, sehingga dengan penambahan kadar *bentonite* ke dalam tanah menyebabkan OMC semakin rendah. Nilai MDD berhubungan dengan W (berat tanah) dan V (volume mold), sedangkan berat tanah

itu sendiri berhubungan dengan W_s (berat butir padat tanah) dan w (berat air). Nilai W_s berbanding lurus dengan G_s (*specific gravity*) tanah. Pada pengujian *specific gravity* diketahui bahwa semakin besar kadar *bentonite* dalam campuran tanah menyebabkan nilai G_s semakin menurun, begitu juga dengan nilai MDD dan OMC. Penambahan kadar *bentonite* dalam tanah menyebabkan nilai MDD dan OMC semakin menurun.

4.4. Uji Permeabilitas Tanah

4.4.1. Pengaruh *Plasticity Index* terhadap Permeabilitas

Dalam beberapa penelitian menyebutkan bahwa tanah dengan nilai *Plasticity Index* (PI) yang rendah memiliki kandungan lempung yang cukup untuk menurunkan konduktivitas hidraulik tanah ketika dipadatkan. *Daniel* (1990) berpendapat bahwa tanah dengan nilai $PI \geq 10\%$ dapat menghasilkan nilai konduktivitas hidraulik yang rendah, tetapi perlu dicatat bahwa beberapa jenis tanah dengan nilai PI kurang dari 7% telah dapat digunakan untuk membuat tanah pelapis dengan nilai konduktivitas hidraulik yang sangat rendah (*Albrecht and Cartwright*, 1989). *Benson, et.al* (1992) melakukan penelitian terhadap benda uji tanah tidak terganggu – pepadatan tanah terhadap berbagai macam karakteristik tanah. Penelitian tersebut ditunjukkan pada hubungan antara konduktivitas hidraulik dan nilai *Plasticity index* seperti pada gambar 4.8 berikut ini. Dari gambar berikut menunjukkan bahwa tanah dengan nilai PI lebih dari 10% dapat dipadatkan untuk menghasilkan konduktivitas hidraulik kurang dari sama dengan 1×10^{-7} cm/s.



Gambar 4.8. Hubungan antara Konduktivitas Hidraulik dengan *Plasticity Index*

Sumber: *Benson, et.al*, 1992

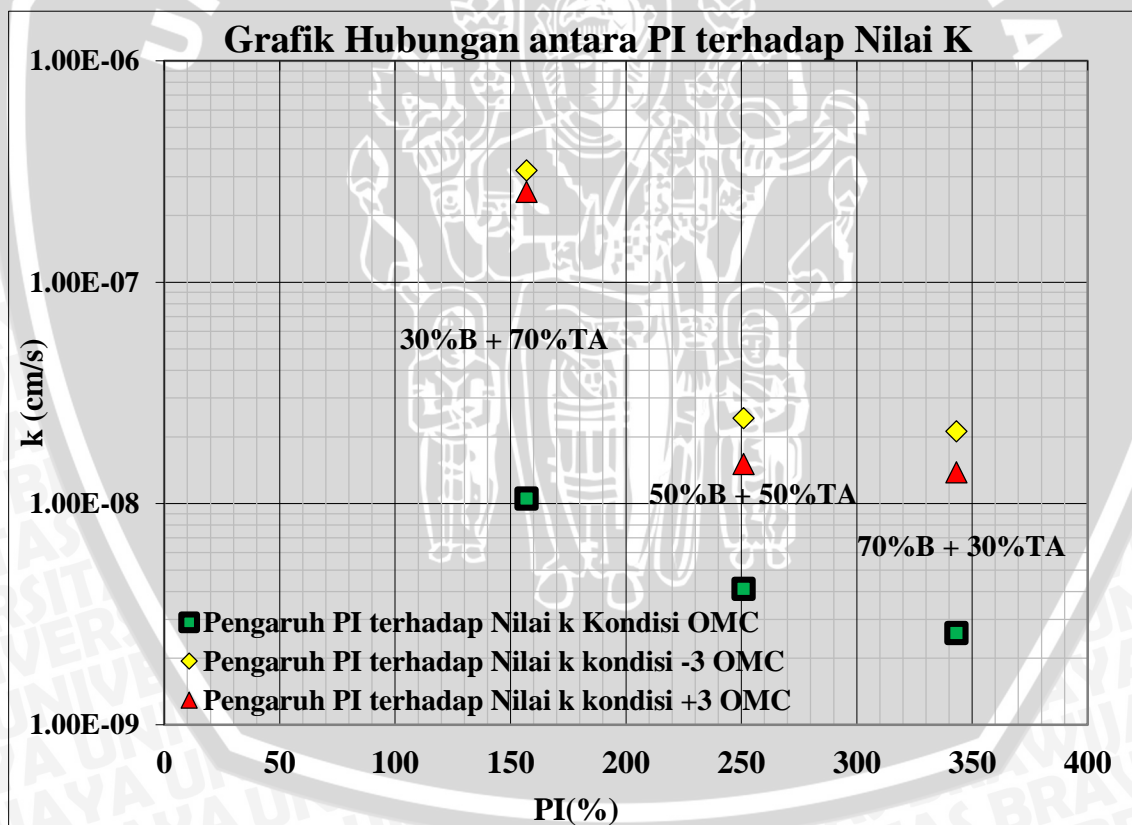
Dari Hasil pengujian Permeabilitas dan *Atterberg Limit*, didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan nilai PI dan k seperti pada Tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4.11 Rekapitulasi hasil perhitungan nilai k dan PI

No.	PI (%)	k (-3% OMC) cm/s	k (kondisi OMC) cm/s	k (+3% OMC) cm/s
1.	156.99	3.21×10^{-7}	1.05×10^{-8}	2.57×10^{-7}
2.	250.96	2.43×10^{-8}	4.12×10^{-9}	1.51×10^{-8}
3.	343.23	2.12×10^{-8}	2.60×10^{-9}	1.38×10^{-8}

Sumber : Hasil perhitungan

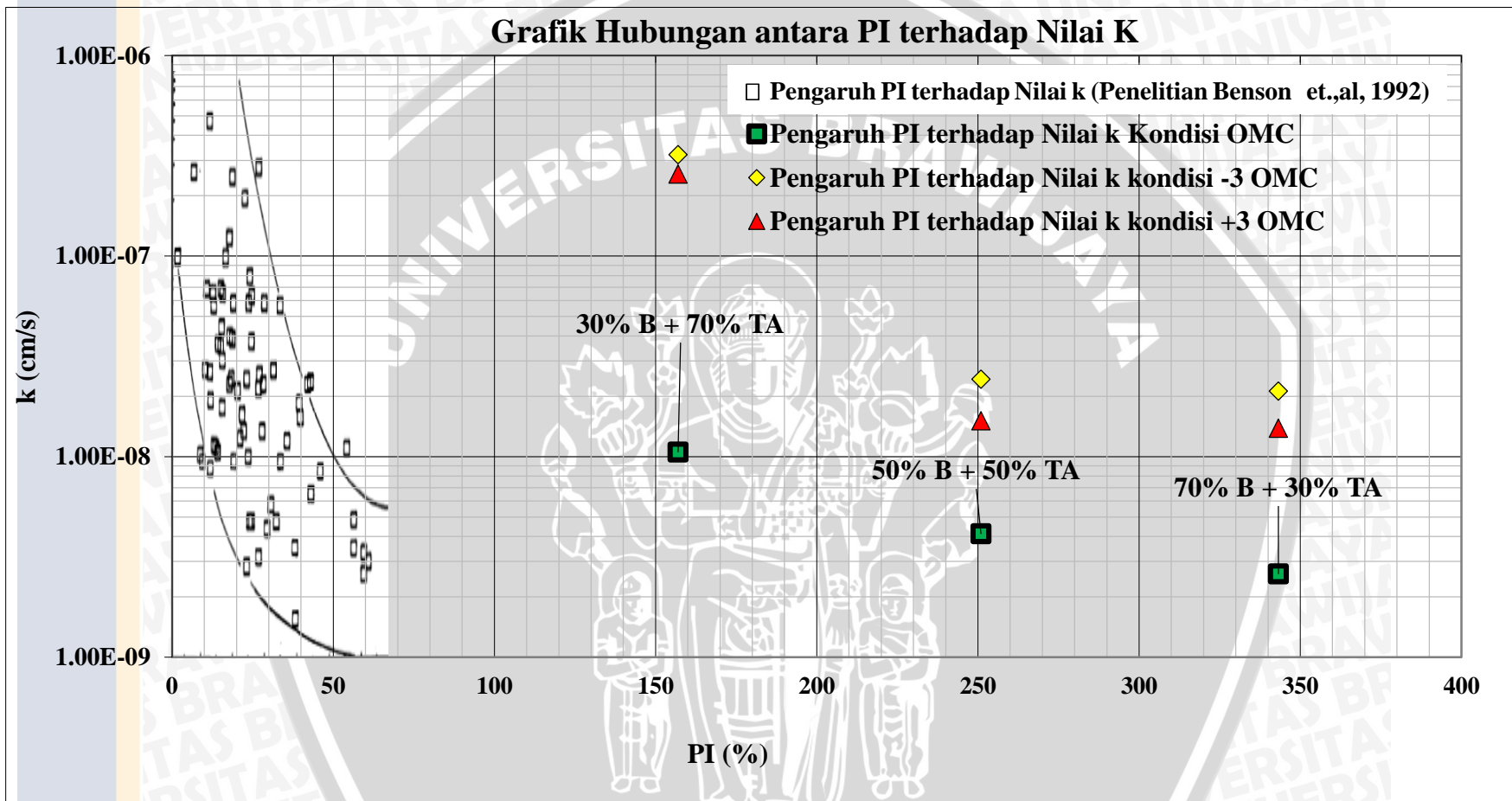
Dari rekapitulasi hasil perhitungan dapat digambarkan hubungan antara Indeks plastisitas dengan konduktivitas hidraulik ketiga campuran seperti pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9. Grafik hubungan antara PI terhadap Konduktivitas hidraulik

Sumber: Data

Dari Gambar 4.9 di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa nilai PI > 100% menghasilkan konduktivitas hidraulik kurang dari 1×10^{-7} cm/s. Gaya tolak-menolak



Gambar 4.10. Grafik hubungan nilai PI dan nilai k
Sumber: Hasil analisa dan data

antar partikel semakin meningkat sehingga menghasilkan struktur yang terdispersi, hal ini menyebabkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *wet side* lebih kecil dibandingkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *dry side* pada nilai PI yang sama. Sedangkan konduktivitas hidraulik pada kondisi optimum menghasilkan nilai yang paling kecil. Hasil pengujian ini sesuai dengan penelitian *Benson et.,al*, 2010 bahwa tanah dengan nilai PI lebih dari 10% dapat dipadatkan untuk menghasilkan konduktivitas hidraulik kurang dari sama dengan 1×10^{-7} cm/s.

Dari grafik hasil penelitian *Benson et.,al*, 2010 dapat digabungkan dengan grafik hasil pengujian untuk melihat karakteristik hubungan antara nilai PI dengan nilai k. Grafik gabungan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10.

Dari grafik gabungan antara hasil pengujian dan hasil penelitian *Benson et.,al*, 1992 dapat pada gambar 4.10 dapat disimpulkan bahwa nilai PI dan konduktivitas hidraulik yang dihasilkan pada penelitian *Benson et.,al*, 1992 jauh berbeda dengan hasil pengujian. Pada penelitian *Benson et.,al*, 1992 dengan nilai PI sebesar 25% mampu menurunkan nilai konduktivitas hidraulik hingga 1×10^{-8} cm/s, sedangkan pada hasil pengujian permeabilitas dengan nilai PI sebesar 160% baru dapat menurunkan konduktivitas hidraulik hingga 1×10^{-8} cm/s.

Namun, dari kedua hasil pengujian ini diperoleh suatu persamaan karakteristik permeabilitas. Kedua grafik hasil pengujian tersebut menggambarkan pola bahwa semakin ke kanan sumbu x, menghasilkan grafik sumbu y semakin ke bawah. Hal ini membuktikan bahwa dengan bertambahnya nilai *Plasticity Index* tanah, nilai konduktivitas hidraulik juga semakin menurun.

4.4.2. Pengaruh Kadar Fraksi Pasir (*sand*) terhadap Permeabilitas

Nilai plastisitas tanah juga dipengaruhi oleh analisa distribusi butiran tanah, salah satunya dapat dilihat dari kadar pasir dalam tanah. Dari hasil pengujian *sieve analysis* dan nilai PI didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan seperti pada tabel 4.12 berikut ini.

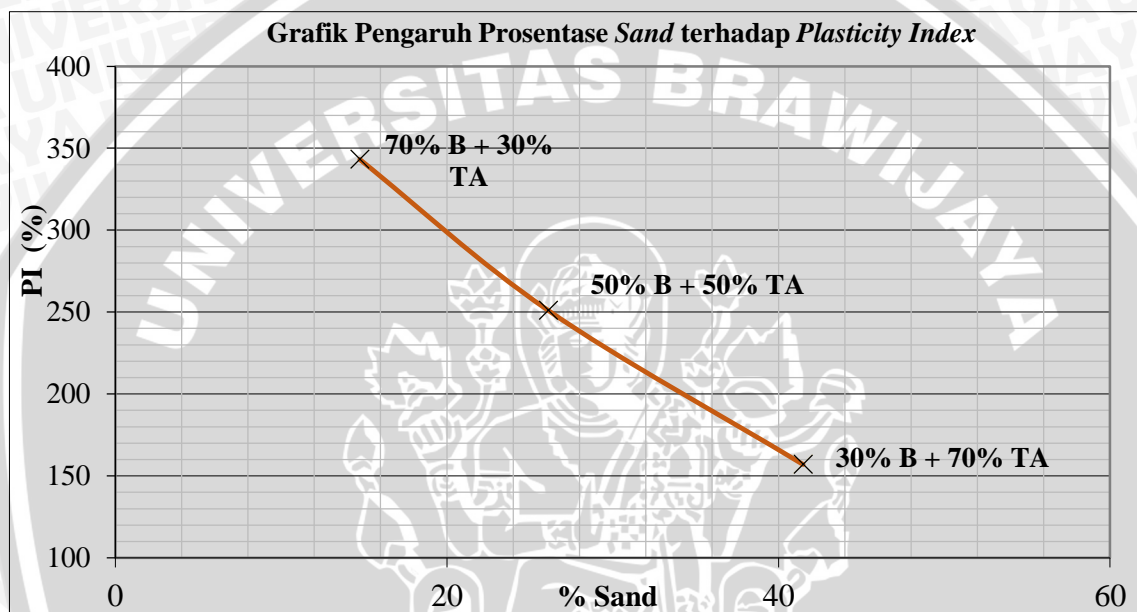
Tabel 4.12. Rekapitulasi perhitungan kadar fraksi pasir dan nilai PI

No.	Prosentase <i>Bentonite</i> (%)	<i>Sand</i> (%)	PI (%)
1	30	41.49	156.99
2	50	26.13	250.96
3	70	14.75	343.23

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel 4.12 di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan menurunnya kadar pasir dalam masing-masing campuran menyebabkan *Plasticity Index* semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa kadar pasir dalam campuran berbanding terbalik dengan PI. Dengan menurunnya kadar pasir dalam campuran tanah menunjukkan bahwa rongga-rongga dalam tanah terisi dan memiliki kemampuan saling mengikat yang besar sehingga menyebabkan nilai plastisitas tanah semakin besar.

Dari hasil pengujian tersebut dapat digambarkan grafik hubungan kadar pasir dalam campuran dengan nilai PI seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Hubungan kadar pasir dan nilai PI
Sumber: Data

Dari hasil pengujian dapat pula diambil hubungan antara kadar pasir dalam campuran dengan konduktivitas hidraulik. Rekapitulasi hasil perhitungan kadar pasir dan nilai k dapat dilihat pada Tabel 4.13 berikut ini.

Tabel 4.13. Rekapitulasi hasil perhitungan kadar pasir dan nilai k

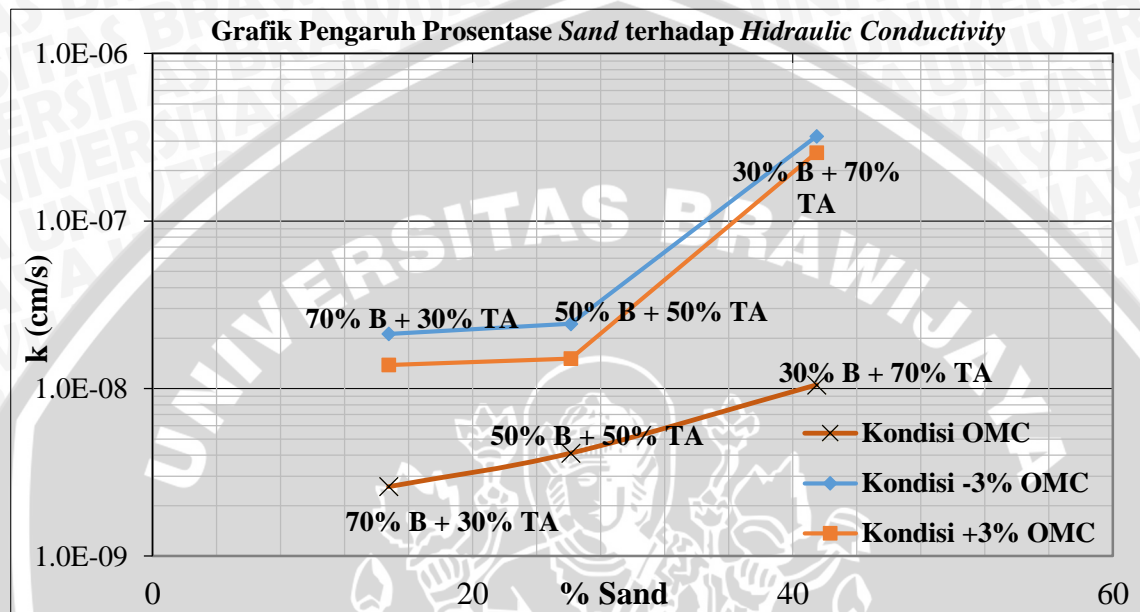
No.	Prosentase Bentonite (%)	Sand (%)	k (-3% OMC) cm/s	k (kondisi OMC) cm/s	k (+3% OMC) cm/s
1	30	41.49	3.21×10^{-7}	1.05×10^{-8}	2.57×10^{-7}
2	50	26.13	2.43×10^{-8}	4.12×10^{-9}	1.51×10^{-8}
3	70	14.75	2.12×10^{-8}	2.60×10^{-9}	1.38×10^{-8}

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.13 menunjukkan bahwa semakin rendah kadar pasir dalam campuran tanah menyebabkan konduktivitas hidraulik semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa

kadar pasir dalam tanah berbanding lurus dengan konduktivitas hidraulik. Dengan berkurangnya kadar pasir dalam tanah semakin kecil pula rongga-rongga dalam tanah, sehingga menyebabkan tanah semakin kedap (dengan nilai konduktivitas hidraulik yang semakin kecil).

Dari hasil pengujian tersebut dapat digambarkan hubungan antara kadar pasir dalam campuran tanah dengan nilai k , seperti pada Gambar 4.12 berikut ini.



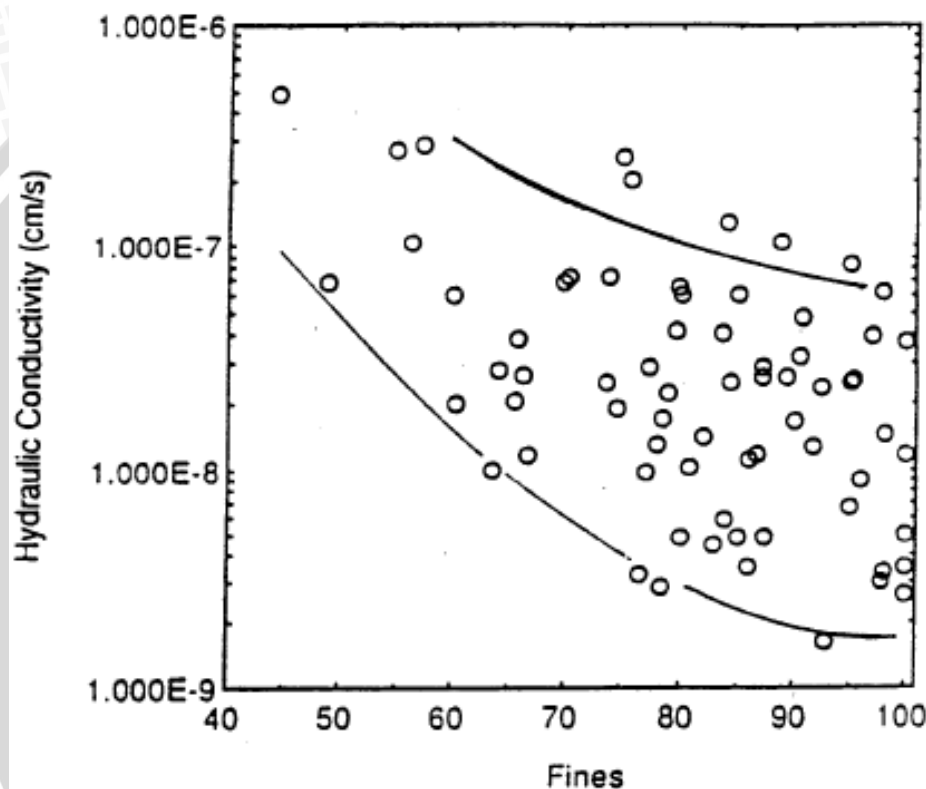
Gambar 4.12. Hubungan antara kadar pasir dengan nilai k
Sumber: Data

Pada kadar pasir yang sama, kondisi *dry side* menyebabkan lapisan ganda terdifusi dari ion-ion yang menyelimuti partikel tanah lempung tidak dapat sepenuhnya berkembang, jadi gaya tolak-menolak antar partikel-partikel juga berkurang dan struktur terflokulasi dengan baik, hal ini menyebabkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *dry side* lebih besar dibandingkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *wet side*. Sedangkan konduktivitas hidraulik pada kondisi optimum menghasilkan nilai yang paling kecil.

4.4.3. Pengaruh Kadar Butiran Halus (*finer*) terhadap Permeabilitas

Butiran halus (*finer*) pada tanah didefinisikan sebagai butiran tanah yang lolos ayakan No. 200 (0,075 mm). Daniel (1990) berpendapat bahwa material pelapis dasar tanah terdiri dari sedikitnya 30% butiran halus. Sedangkan data dari Benson *et.,al* (1992) menunjukkan bahwa sedikitnya 50% butiran halus sebagai persyaratan sebelum melakukan pekerjaan konstruksi untuk berbagai jenis tanah. Dalam pemerisaan di lapangan harus dapat memastikan bahwa prosentase butiran halus yang digunakan memenuhi atau melampaui batas minimum yang ditetapkan dalam spesifikasi pekerjaan konstruksi, terutama prosentase butiran halus kurang dari 50% juga perlu diperhatikan.

Kadar tanah lempung dalam tanah dapat didefinisikan menjadi bermacam-macam, tetapi pada umumnya adalah prosentase tanah yang memiliki diameter partikel butiran lebih kecil dari 0,005 atau 0,002 mm, dimana 0,002 mm menjadi pedoman umum. *Benson et., al*, (1992) menggambarkan hubungan konduktivitas hidraulik dengan kadar lempung dalam tanah (didefinisikan sebagai partikel < 0,002 mm) seperti pada Gambar 4.13. *Benson et.,al*, (1992) juga menemukan bahwa kadar lempung berhubungan dengan *plasticity index*. Tanah dengan $PI > 10\%$ umumnya mengandung sedikitnya 10% sampai 20% lempung.



Gambar 4.13 Hubungan antara Konduktivitas Hidraulik dengan Prosentase Butir Halus
Sumber: *Benson et.,al*, 1992

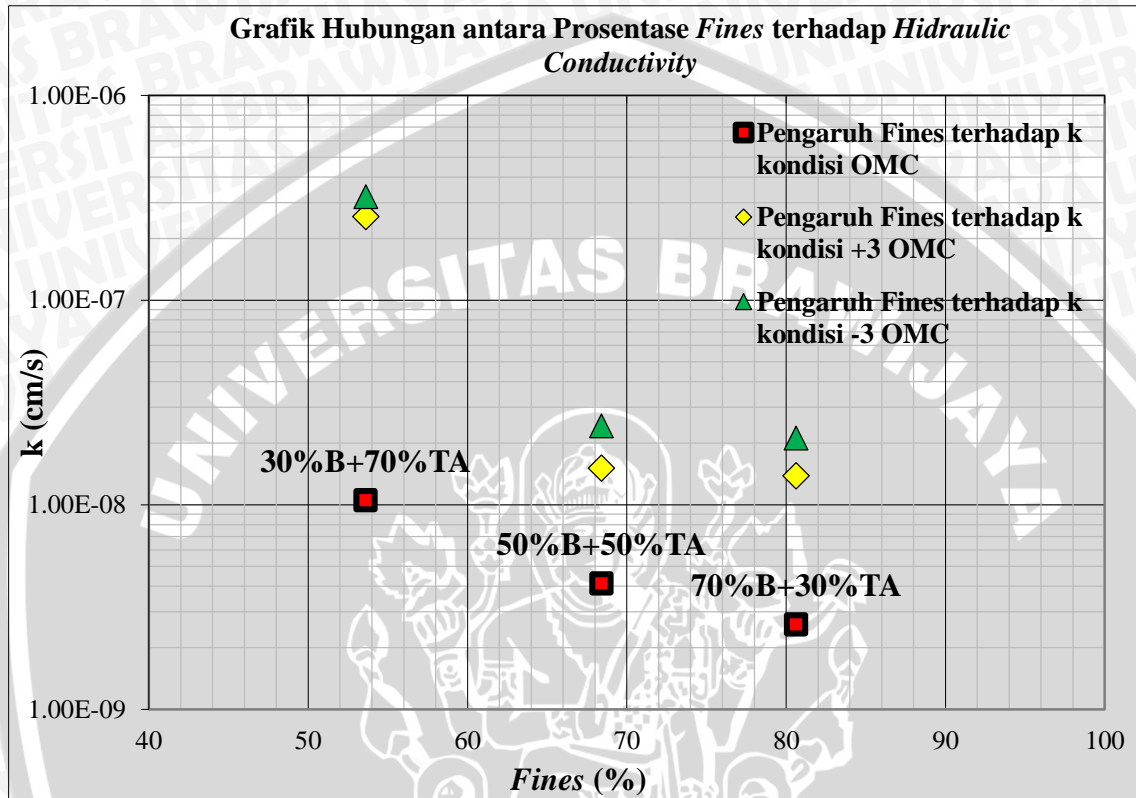
Dari hasil pengujian *sieve analysis finer parts* dan permeabilitas, didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan yang dapat dilihat pada Tabel 4.14 berikut ini.

Tabel 4.14 Rekapitulasi hasil pengujian kadar *finer* dan konduktivitas hidraulik

No.	Prosentase Bentonite (%)	<i>Finer</i> (%)	k (-3% OMC) cm/s	k (kondisi OMC) cm/s	k (+3% OMC) cm/s
1	30	53.61	3.21×10^{-7}	1.05×10^{-8}	2.57×10^{-7}
2	50	68.41	2.43×10^{-8}	4.12×10^{-9}	1.51×10^{-8}
3	70	80.63	2.12×10^{-8}	2.60×10^{-9}	1.38×10^{-8}

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4.14 menunjukkan bahwa nilai *finer* (butiran halus) berbanding terbalik dengan konduktivitas hidraulik, artinya semakin besar nilai *finer* dalam tanah menyebabkan nilai konduktivitas hidraulik semakin menurun. Dari Tabel 4.14 di atas dapat digambarkan hubungan antara kadar butiran halus dalam tanah dengan konduktivitas hidraulik seperti pada Gambar 4.14 berikut ini.

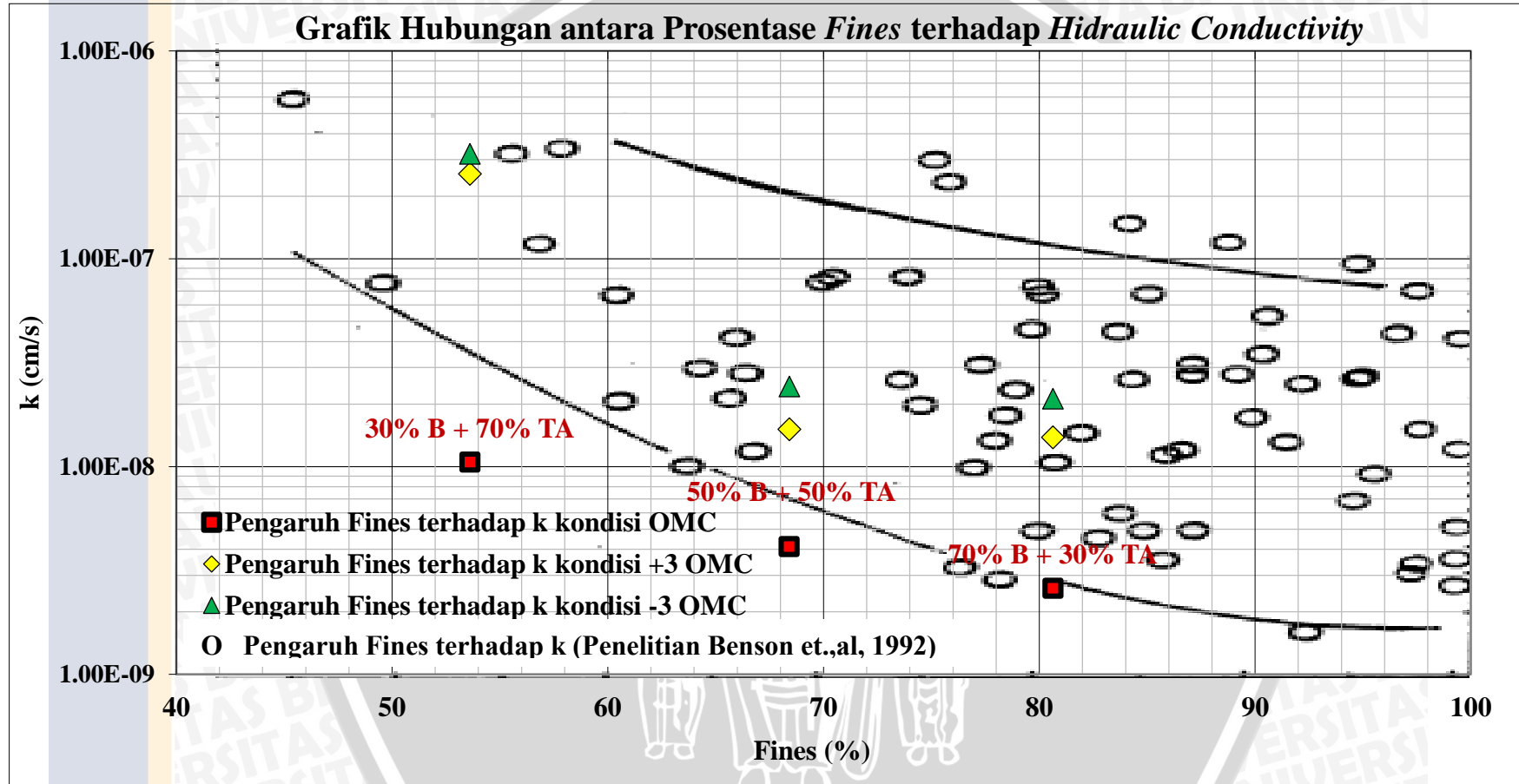


Gambar 4.14. Hubungan antara kadar *finer* dengan nilai *k*

Sumber: Data

Dari hasil pengujian hubungan permeabilitas terhadap kadar *finer* dan hasil penelitian *Benson et.,al*, 1992 dapat digambarkan gabungan grafik untuk menunjukkan karakteristik permeabilitas kadar *finer* dalam tanah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.

Pada Gambar 4.15 nilai pada sumbu x semakin ke kanan dan nilai pada sumbu y semakin ke bawah, hal ini menunjukkan bahwa diantara hasil pengujian permeabilitas dengan kadar *finer* dan hasil penelitian *Benson et.,al*, 1992 memiliki pola dan karakteristik yang sama. Pada penelitian *Benson et.,al*, 1992 dengan kadar *finer* sebesar 81% mampu menurunkan konduktivitas hidraulik hingga 1×10^{-9} , nilai ini sama dengan konduktivitas yang dihasilkan pada hasil pengujian permeabilitas.

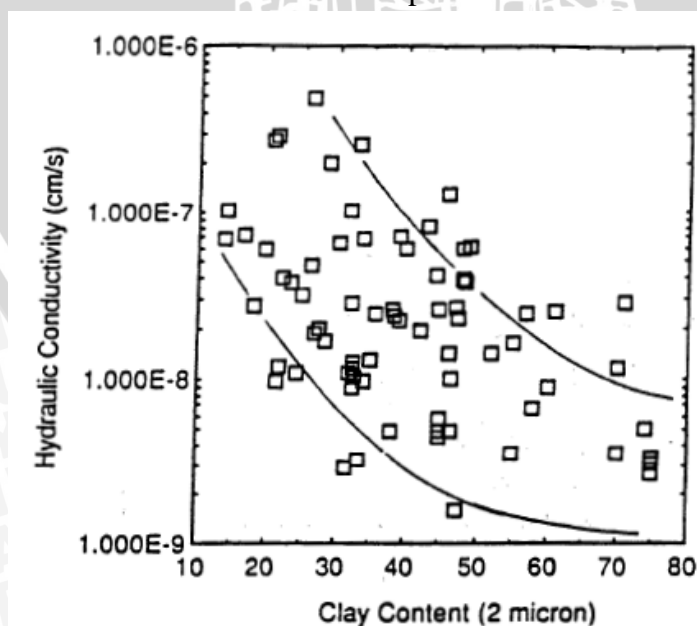


Gambar 4.15. Hubungan antara kadar *fines* terhadap nilai k
Sumber: Hasil analisa dan data

Kadar *finer* dalam tanah yang semakin besar menunjukkan bahwa rongga-rongga dalam tanah semakin terisi oleh butiran halus tanah sehingga meningkatkan kepadatan tanah. Dengan kepadatan tanah yang semakin meningkat menyebabkan tanah semakin kedap dengan nilai konduktivitas hidraulik yang rendah.

Kadar lempung (*clay*) dalam tanah pada umumnya didefinisikan sebagai prosentase tanah yang memiliki diameter partikel lebih kecil dari 0,005 atau 0,002 mm, dengan 0,002 mm sebagai definisi yang jauh lebih umum. Kadar lempung dalam tanah dapat diukur dengan cara analisis sedimentasi (ASTM D - 422). Sebagian spesifikasi pada konstruksi ada yang menentukan kadar lempung minimum, tetapi ada sebagian juga yang tidak menentukannya. Parameter yang biasanya digunakan adalah nilai aktivitas tanah (A), yang didefinisikan sebagai indeks plastisitas yang dinyatakan dalam persen dibagi dengan persentase tanah lempung (< 0,002 mm) dalam tanah. Nilai A yang sangat tinggi (>1) menunjukkan bahwa tanah tersebut mengandung mineral lempung *montmorillonite*. *Lambert and Whitman* (1969) meneliti bahwa nilai A dari tanah *kaolinite*, *illite*, dan *montmorillonite* adalah sebesar masing-masing 0,38; 0,9 dan 7,2. Sedangkan nilai A untuk material *clay liner* yang mengandung campuran mineral berkisar antara $0,5 \leq A \leq 1$.

Benson et.,al, 1992 yang terkait dengan konduktivitas hidraulik tanah lempung (yang didefinisikan sebagai partikel < 0,002 mm) dan menggambarkan korelasinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Dari data menunjukkan bahwa tanah setidaknya harus mengandung 10% sampai dengan 20% tanah lempung agar bisa dipadatkan untuk menghasilkan konduktivitas hidraulik mencapai 1×10^{-7} cm/s.



Gambar 4.16. Hubungan antara persentase lempung dengan nilai k
Sumber: *Benson et.,al*, 1992

Tanah dengan gumpalan yang ditimbulkan merujuk pada jenis tanah kohesif. Ukuran maksimum gumpalan dimungkinkan untuk ditentukan dalam konstruksi. Ukuran gumpalan sangat penting bagi tanah lempung yang kering dan keras (Benson dan Daniel, 1990). Material ini umumnya harus dihancurkan menjadi gumpalan kecil agar bisa terhidrasi dengan baik, dibentuk ulang, dan dipadatkan. Namun sebaliknya, ukuran gumpalan kurang begitu penting bagi tanah basah dan halus, karena gumpalan basah dapat dengan mudah dibentuk ulang menjadi homogen, dengan menghasilkan konduktivitas hidraulik yang rendah dan usaha pemadatan yang wajar.

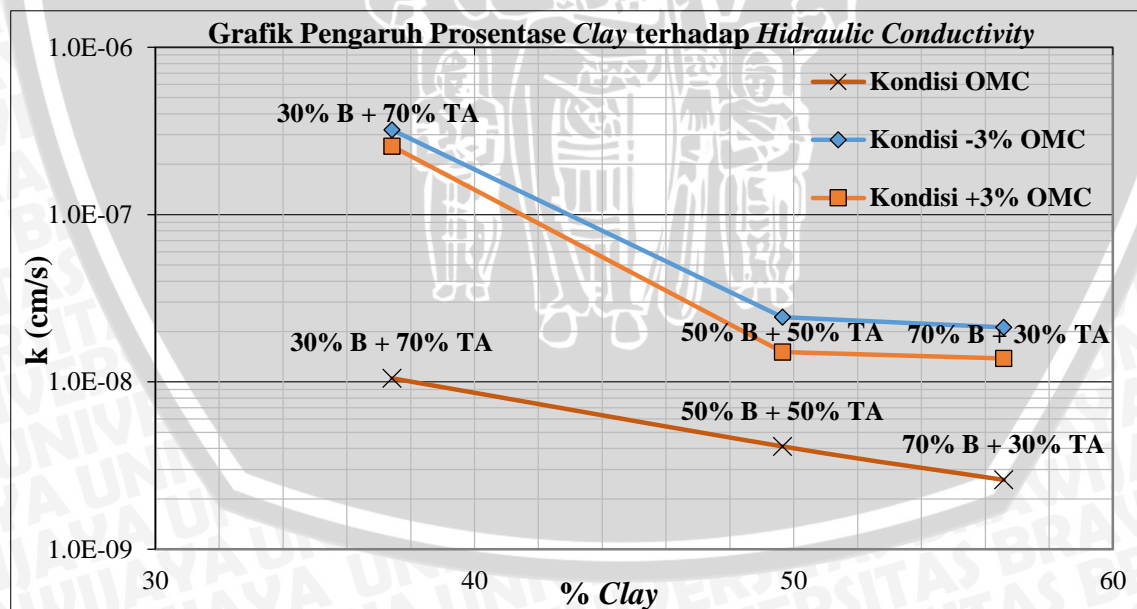
Dari hasil pengujian permeabilitas dan *sieve analysis*, diperoleh rekapitulasi perhitungan seperti pada Tabel 4.15 berikut ini.

Tabel 4.15. Rekapitulasi hasil pengujian kadar lempung dan konduktivitas hidraulik

No	Prosentase Bentonite (%)	Clay (%)	k (-3% OMC) cm/s	k (kondisi OMC) cm/s	k (+3% OMC) cm/s
1	30	37.41	3.208E-07	1.050E-08	2.565E-07
2	50	49.65	2.434E-08	4.120E-09	1.512E-08
3	70	56.58	2.122E-08	2.600E-09	1.384E-08

Sumber: Hasil perhitungan

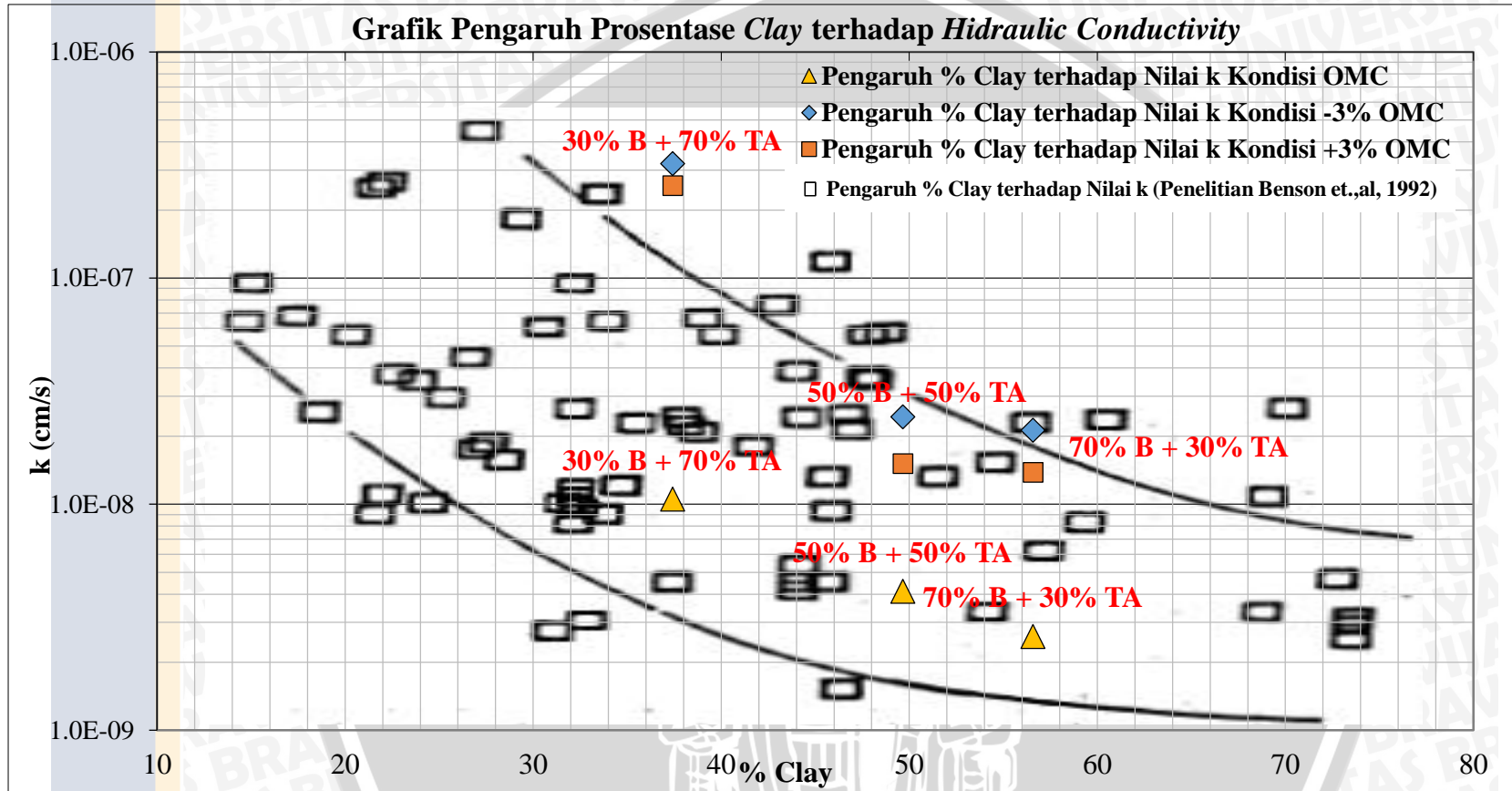
Dari Tabel 4.15 di atas dapat digambarkan grafik hubungan antara kadar lempung dan konduktivitas hidraulik seperti pada gambar 4.17 berikut ini.



Gambar. 4.17. Hubungan antara kadar lempung terhadap nilai k

Sumber: Hasil analisa dan data

Pada kadar lempung yang sama, kondisi *dry side* menyebabkan lapisan ganda terdifusi dari ion-ion yang menyelimuti partikel tanah lempung tidak dapat sepenuhnya berkembang, jadi gaya tolak-menolak antar partikel-partikel juga berkurang dan struktur

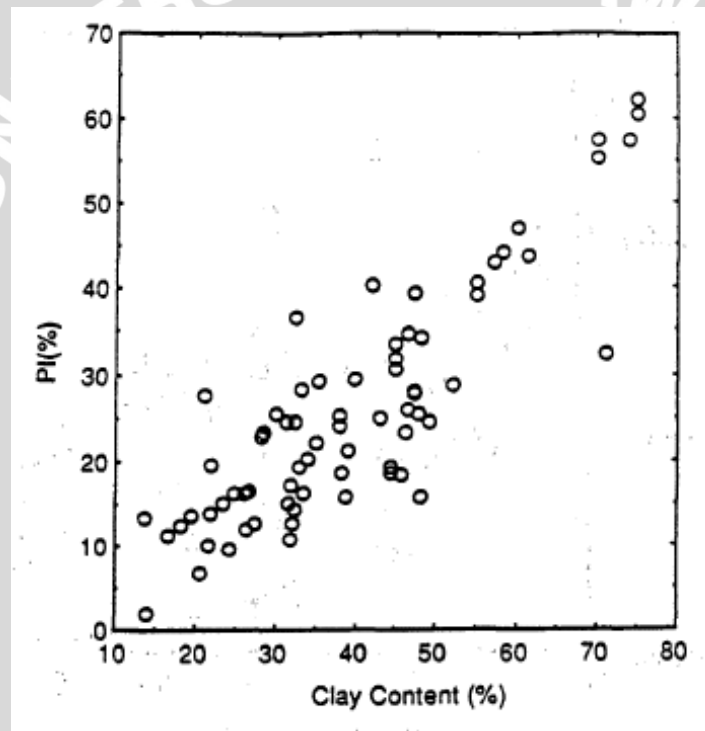


Gambar 4.18. Hubungan antara kadar lempung dan nilai k
Sumber: Hasil analisa dan data

terflokulasi dengan baik, hal ini menyebabkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *dry side* lebih besar dibandingkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *wet side*. Sedangkan konduktivitas hidraulik pada kondisi optimum menghasilkan nilai yang paling kecil.

Dari grafik hubungan kadar lempung dan nilai k pada penelitian *Benson et.,al*, 1991 dan hasil pengujian dapat digabungkan untuk menggambarkan karakteristik permeabilitas seperti pada Gambar 4.18.

Dari hasil penelitian *Benson et.,al*, 1992 menunjukkan bahwa dengan bertambahnya kadar lempung dalam tanah menyebabkan nilai PI semakin meningkat. Dengan kadar lempung sebesar 40% mampu menghasilkan nilai PI sebesar 25%. *Benson et.,al*, 1992 menggambarkan grafik hasil penelitian hubungan antara kadar lempung dengan nilai PI dalam tanah seperti pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19. Hubungan antara kadar lempung dengan nilai PI

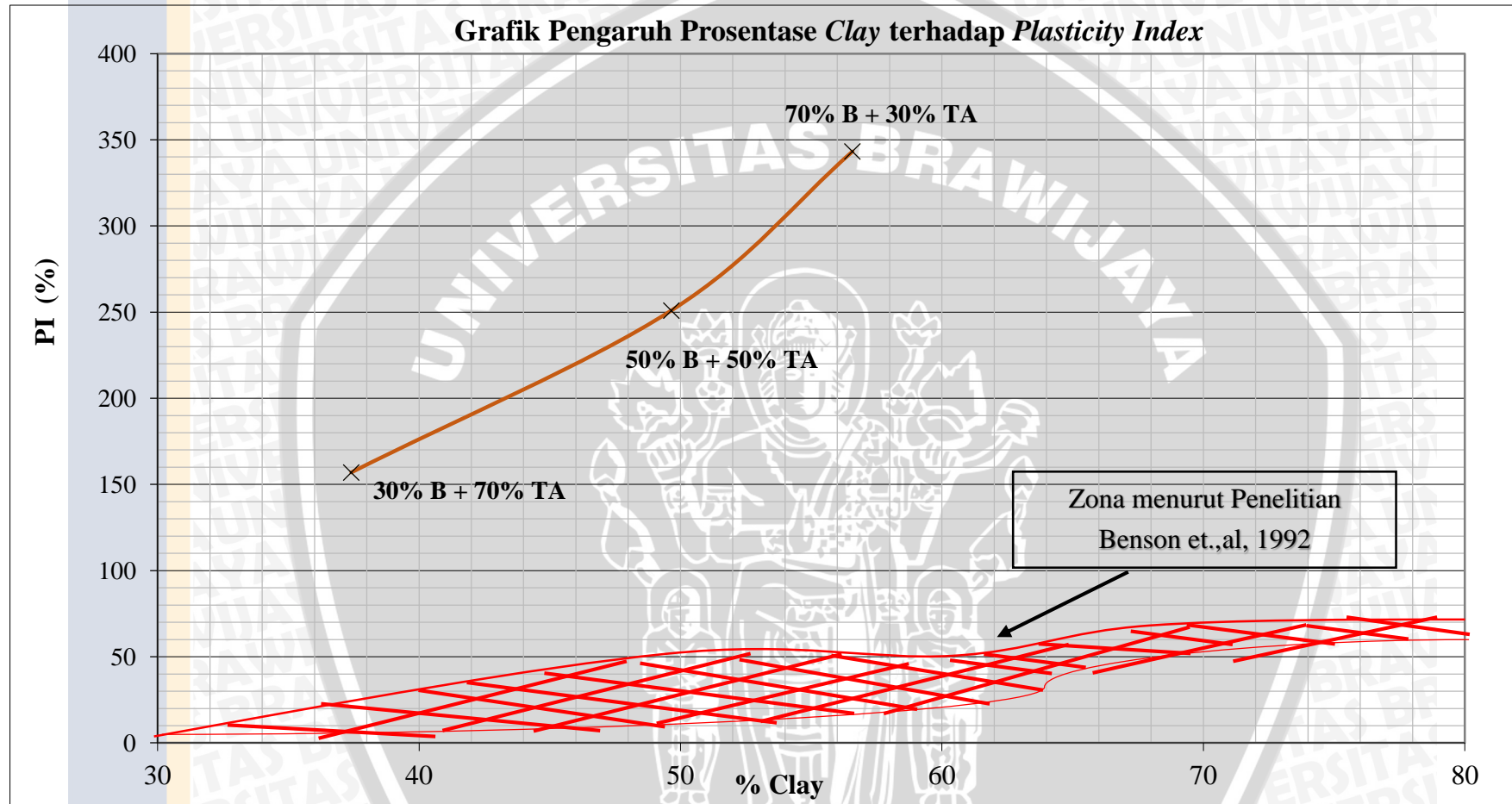
Sumber: *Benson.,et.,al*, 1992

Dari hasil pengujian didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan kadar lempung dengan nilai PI seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.16 berikut ini.

Tabel 4.16. Rekapitulasi hasil perhitungan nilai PI dan kadar lempung

No	Prosentase Bentonite (%)	Clay (%)	PI (%)
1	30	37.41	156.99
2	50	49.65	250.96
3	70	56.58	343.23

Sumber: Hasil perhitungan



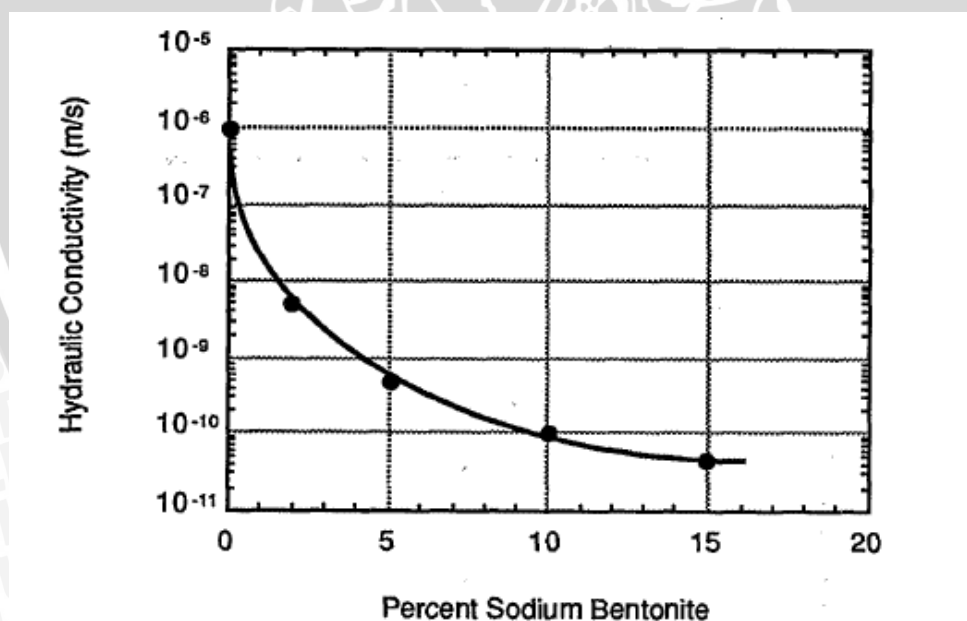
Gambar 4.20 Grafik pengaruh kadar lempung dengan nilai PI
Sumber: Hasil analisa dan data

Dari data yang diperoleh di atas dapat disimpulkan bahwa, pada pengujian PI menunjukkan hasil yang sangat berbeda dengan masing-masing kadar lempung dalam tanah, namun masih memiliki karakteristik yang sama dengan penelitian *Benson et.,al*, 1992. Pada pengujian PI menunjukkan bahwa dengan kadar lempung sebesar 40% mampu meningkatkan nilai PI sebesar 175%. Dengan kadar lempung yang sama nilai PI yang dihasilkan berbeda jauh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh *Benson et.,al*, 1992.

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh *Benson et.,al*, 1992 dan hasil pengujian dapat ditarik hubungan dengan menggambarkan grafik gabungan kadar lempung dengan nilai PI seperti pada Gambar 4.20.

4.4.4. Pengaruh Penambahan *Bentonite* terhadap Permeabilitas

Benson et.,al, 1992 juga menggambarkan grafik hasil penelitian penambahan *Sodium Bentonite* ke dalam tanah pasir kelanauan. Efek penambahan *Bentonite* terhadap konduktivitas hidrolis ditunjukkan pada gambar 4.21. untuk setiap tanah pasir kelanauan. Sebagai contoh untuk penambahan 4% sodium *Bentonite* cukup untuk menurunkan konduktivitas hidrolis lebih kecil dari dari 1×10^{-7} m/s. Grafik hasil penelitian *Benson et.,al* dapat dilihat pada Gambar 4.21 berikut ini.



Gambar 4.21. Hubungan penambahan *sodium bentonite* terhadap konduktivitas hidraulik

Sumber: *Benson et.,al*, 2010

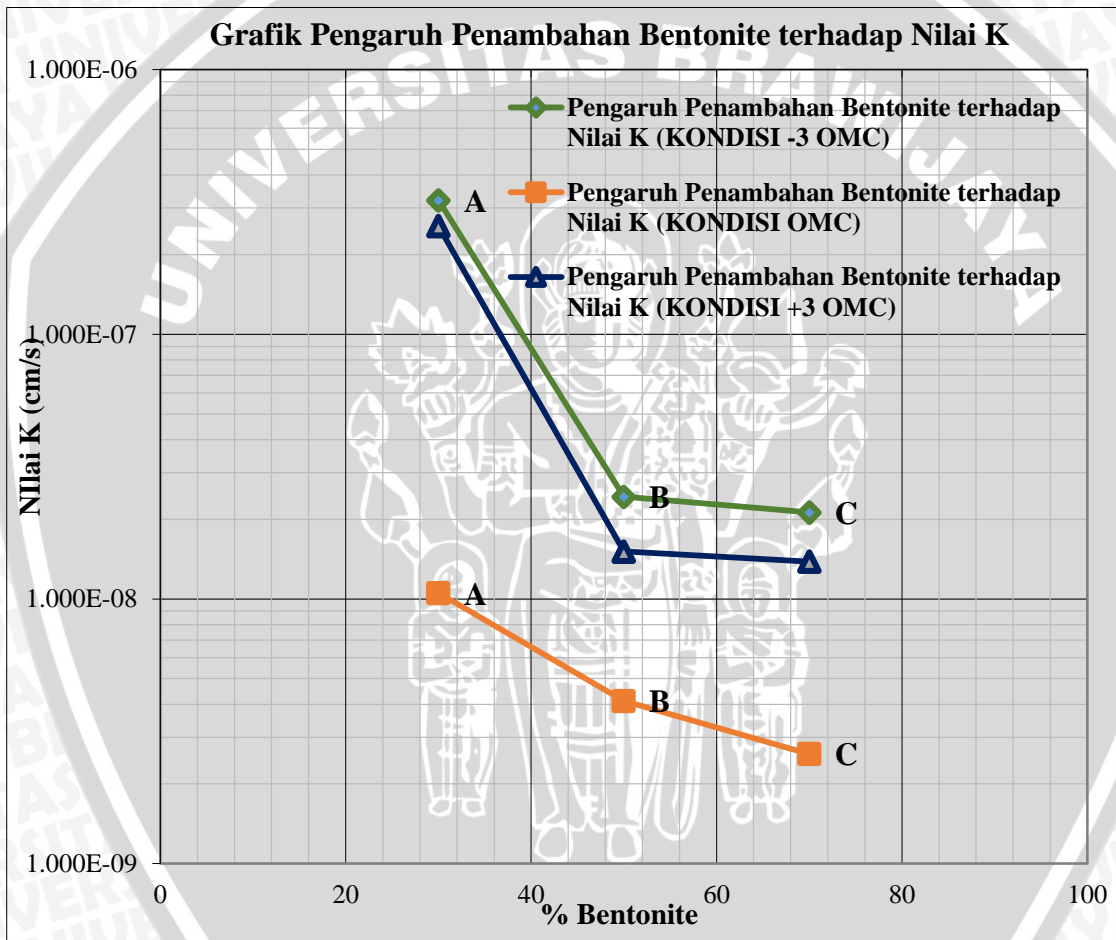
Dari hasil pengujian permeabilitas pada penelitian, didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan yang dapat dilihat pada Tabel 4.17 berikut ini.

Tabel 4.17. Rekapitulasi hasil pengujian permeabilitas

No	Prosentase Bentonite (%)	k (-3% OMC) cm/s	k (kondisi OMC) cm/s	k (+3% OMC) cm/s
1	30	3.208E-07	1.050E-08	2.565E-07
2	50	2.434E-08	4.120E-09	1.512E-08
3	70	2.122E-08	2.600E-09	1.384E-08

Sumber: Hasil perhitungan

Dari data yang diperoleh pada Tabel 4.17 dapat ditarik hubungan antara prosentase *bentonite* dengan nilai *k* pada ketiga kondisi tersebut, seperti pada Gambar 4.22 berikut ini.



Gambar 4.22. Pengaruh penambahan bentonite terhadap nilai *k*
Sumber: Data

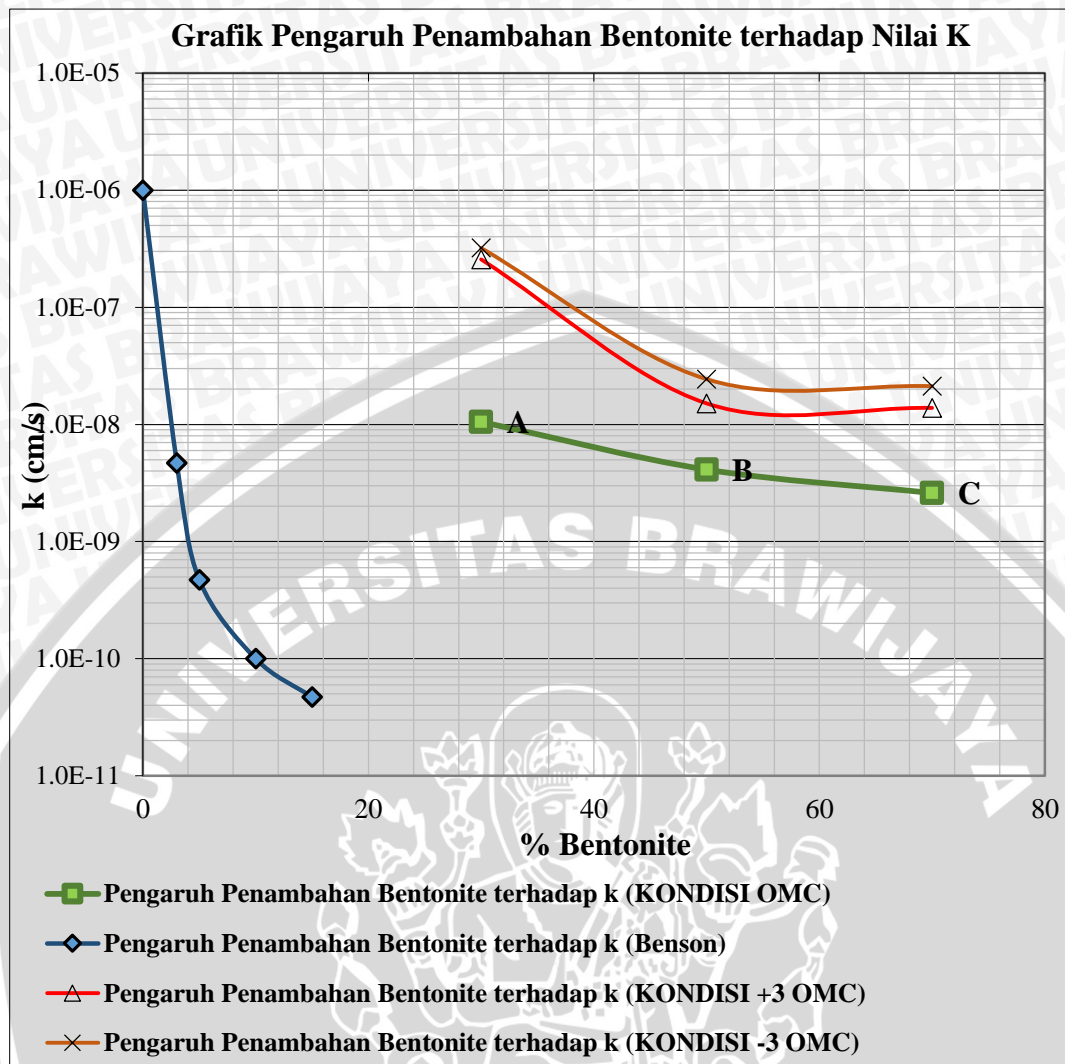
Dari gambar di atas dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya kadar *Bentonite* dalam tanah menyebabkan nilai koefisien permeabilitas menurun. *Bentonite* mengisi rongga-rongga halus dalam tanah serta membuatnya kedap dengan menurunkan angka pori dan konduktivitas hidraulik hingga mencapai 10^{-9} cm/s. Nilai permeabilitas juga menurun saat kadar air mendekati optimum, baik dalam kondisi *dry side* maupun

wet side dimana nilai permeabilitas pada kondisi *wet side* lebih kecil dibandingkan kondisi *dry side*.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22 kurva pemadatan pada kondisi *dry side* terletak di atas kurva pemadatan pada kondisi *wet side*. Dalam kaitannya dengan permeabilitas, nilai konduktivitas hidraulik lebih besar pada pemadatan tanah kondisi *dry side* disebabkan oleh rongga-rongga yang timbul akibat pemadatan. Kadar air pada kurva pemadatan dapat diukur dengan benda uji pemadatan tanah pada kondisi *dry* maupun *wet side*. Pada kurva pemadatan terdapat beberapa perbedaan disebabkan oleh perbedaan struktur.

Pada kadar air yang rendah, lapisan ganda terdifusi dari ion-ion yang menyelimuti partikel tanah lempung tersebut tidak dapat sepenuhnya berkembang, jadi gaya tolak-menolak antar partikel-partikel juga berkurang. Sebagai hasilnya didapat suatu struktur tanah dengan arah partikel yang relatif acak pada kadar air yang rendah. Struktur tanah yang acak ini menyebabkan banyaknya rongga-rongga dalam tanah, sehingga memperkecil konduktivitas hidraulik. Bila kadar air ditambah, maka lapisan ganda terdifusi di sekeliling partikel tanah akan mengembang, sehingga terjadi peningkatan gaya tolak-menolak antar partikel-partikel lempung dan akan menghasilkan tingkat flokulasi yang lebih kecil dan berat volume kering yang lebih besar. Bila kadar air terus ditingkatkan, maka lapisan ganda juga akan semakin mengembang dan gaya tolak-menolak antar partikel juga akan semakin meningkat. Hal ini menyebabkan rongga-rongga yang timbul pada saat pemadatan lebih sedikit dibandingkan kondisi *dry side* sehingga menghasilkan konduktivitas hidraulik pada kondisi *wet side* yang lebih kecil.

Dari grafik hasil penelitian *Benson et.,al* dan hasil pengujian permeabilitas dapat digabungkan untuk menunjukkan kriteria penambahan bentonite terhadap konduktivitas hidraulik dari masing-masing prosentase. Grafik gabungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23. Grafik gabungan penelitian *Benson et.,al*, 2010 dan hasil pengujian
Sumber: Hasil analisa dan data

Dari Gambar 4.23 dapat ditarik kesimpulan bahwa ada perbedaan nilai konduktivitas hidraulik (k) pada hasil penelitian *Benson et.,al*, 2010 dan hasil pengujian permeabilitas. Dari Penelitian *Benson et.,al*, 2010 menunjukkan bahwa nilai k menurun sebesar $< 1 \times 10^{-8}$ pada penambahan 2% sodium bentonite, sedangkan pada hasil pengujian permeabilitas pada penambahan 30% sodium bentonite baru dapat menurunkan nilai k sebesar $\leq 1 \times 10^{-8}$ kondisi OMC. Berbeda lagi dengan kondisi -3% dari OMC dan +3% dari OMC, nilai k menurun sebesar $< 1 \times 10^{-6}$.

Perbedaan penurunan konduktivitas hidraulik ini disebabkan karena jenis sodium bentonite yang digunakan oleh *Benson et.,al*, 2010 dan pada pengujian permeabilitas berbeda. Namun dari kedua penelitian ini dapat diambil persamaan hasil penelitian yaitu terjadinya penurunan nilai k sebesar $< 1 \times 10^{-6}$ dengan menambahkan sodium bentonite ke dalam tanah pasir kelanauan. Nilai k sebesar $< 1 \times 10^{-6}$ ini dapat dijadikan batas pedoman penambahan sodium bentonite ke dalam tanah pasir kelanauan.