

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Indeks Plastisitas

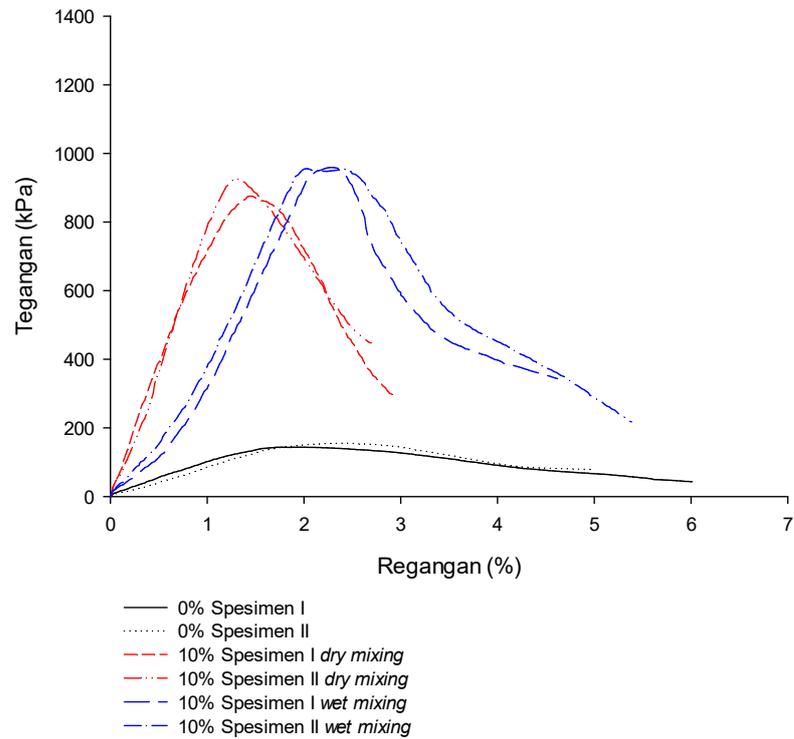
Hasil dari pengujian batas-batas konsistensi dapat dilihat pada Tabel 4.1. penambahan semen sebanyak 10% menunjukkan adanya penurunan batas cair dan peningkatan batas plastis. Kedua hal tersebut terjadi pada sampel clayshale dan siltstone. Clayshale yang telah distabilisasi semen menurun nilai batas cairnya sebesar 15,2% dan batas plastis meningkat sebesar 9,3%. Perubahan yang terjadi pada batas cair siltstone tidak terlalu signifikan, hanya 7,9%. Sedangkan batas plastisnya meningkat sebesar 4,9%. Indeks plastisitas dari kedua jenis mudrock tersebut mengalami penurunan setelah distabilisasi semen. Indeks plastisitas mengalami peturunan sebesar 24,5% pada clayshale dan 12,7% pada siltstone.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Batas-Batas Konsistensi Tanah

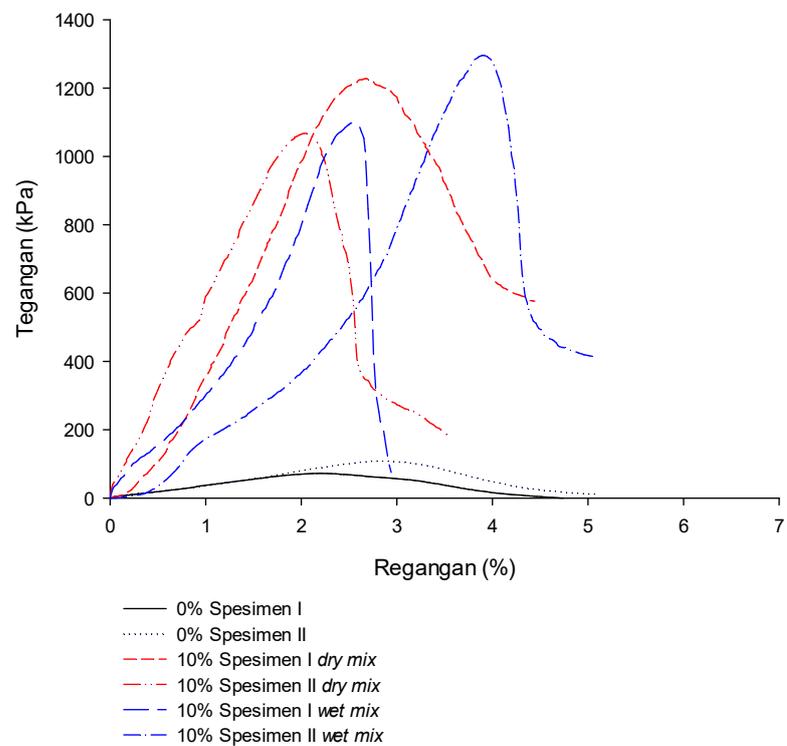
Sampel	Batas cair (LL) (%)	Batas Plastis (PL) (%)	Indeks Plastisitas (PI) (%)
<i>Clayshale</i>	57,9	28,4	29,5
<i>Clayshale</i> 10% semen	42,7	37,7	5,0
<i>Siltstone</i>	47,6%	30,7%	16,9%
<i>Siltstone</i> 10% semen	39,8%	35,6%	4,2%

4.2. Kurva Hubungan Tegangan Aksial dan Regangan

Pengujian kuat tekan bebas akan menghasilkan data hubungan antara tegangan dan regangan. Data tersebut disajikan dalam bentuk grafik. Grafik ini dapat digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan bebas dan modulus elastisitas dari benda uji. Hasil pengujian kuat tekan bebas pada *mudrock* yang distabilisasi dengan menggunakan metode *dry mixing* dan *spray mixing* ditampilkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Setiap benda uji memiliki perilaku yang berbeda-beda. Regangan saat kuat tekan maksimum terjadi semakin menurun pada spesimen yang telah distabilisasi dengan menggunakan semen. Sejalan dengan hal tersebut, tegangan aksial yang mampu diterima juga meningkat apabila semen ditambahkan pada spesimen.



Gambar 4.1 Hubungan Tegangan dan Regangan pada *Clayshale*



Gambar 4.2 Hubungan Tegangan dan Regangan pada *Siltstone*

4.3. Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh spesimen sebelum mengalami keruntuhan atau regangan axial sebesar 15%. Hasil dari pengujian kuat tekan bebas dapat dilihat pada Lampiran 6 dan 7. Nilai kuat tekan bebas rata-rata dari tiga spesimen yang diuji dijabarkan pada Tabel 4.2. Kuat tekan bebas maksimum yang dihasilkan oleh spesimen *clayshale* dengan kadar semen 10% meningkat sebesar 602% untuk metode *dry mixing* dan 640,1% untuk metode *spray mixing*. Sedangkan pada *siltstone*, kuat tekan bebas meningkat sebesar 1171,2% dengan menggunakan metode *dry mixing* dan 1226,6% untuk metode *spray mixing*. Spesimen *clayshale* yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 900,125 kPa. Sedangkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *spray mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 957,154 kPa. Spesimen *siltstone* dengan metode *dry mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 1147,476 kPa. Sedangkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *spray mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 1197,490 kPa.

Tabel 4.2 Nilai Kuat Tekan Bebas Rata-Rata

Kadar Semen	Kuat Tekan Bebas (kPa)			
	<i>Clayshale</i>		<i>Siltstone</i>	
	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>
0%	149,531	149,531	90,270	90,270
10%	900,125	957,154	1147,476	1197,490

4.4. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah parameter untuk mengidentifikasi tingkat kegetasan dari spesimen. Modulus elastisitas pada pengujian kuat tekan bebas dinyatakan dalam nilai *secant modulus*. Persamaan 3.1 diterapkan pada grafik hubungan tegangan dan regangan untuk mendapatkan nilai *secant modulus*. Nilai *secant modulus* dari hasil pengujian disajikan pada Tabel 4. 3. *Secant modulus* pada *clayshale* yang distabilisasi semen dengan metode *dry mixing* mengalami peningkatan yang paling besar. Pada spesimen *clayshale* dan *siltstone*, metode *dry mixing* menghasilkan *secant modulus* yang lebih besar. Hal ini berarti dengan metode *dry mixing*, spesimen yang dihasilkan akan memiliki sifat yang lebih getas apabila dibandingkan dengan spesimen *spray mixing*.

Tabel 4.3 Nilai *Secant Modulus* Rata-Rata

Kadar Semen	<i>Secant Modulus</i> (MPa)			
	<i>Clayshale</i>		<i>Siltstone</i>	
	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>
0%	9,495	9,495	3.742	3.742
10%	76,690	39,036	49,507	48,180

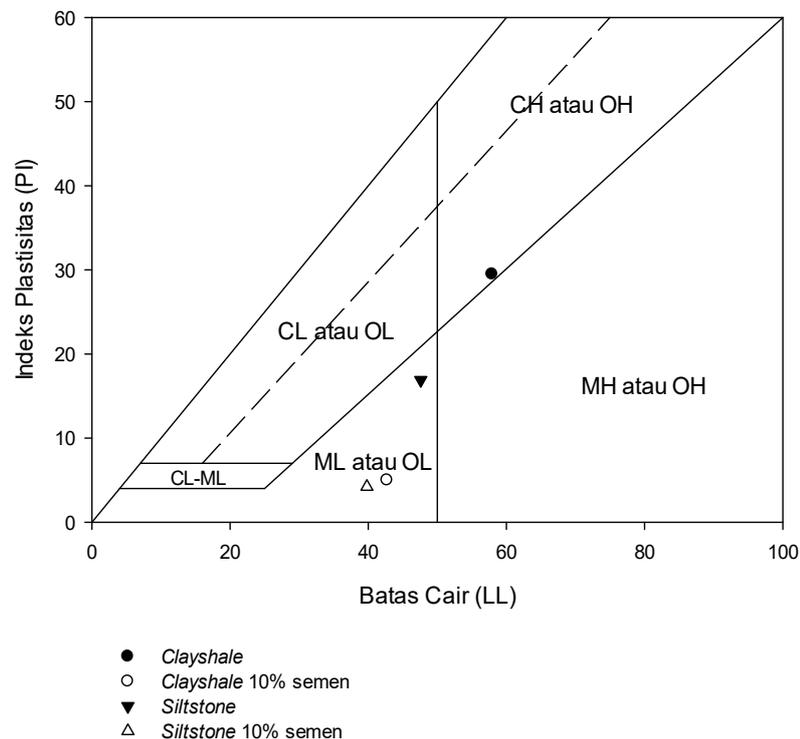
4.5. Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Indeks Plastisitas Tanah

Penambahan semen sebanyak 10% dapat menurunkan indeks plastisitas sebesar 24,5% pada *clayshale* dan 12,7% pada *siltstone*. Menurut Djelloul dkk.(2018) hal ini disebabkan oleh proses flokulasi dan aglomerasi yang terjadi antara mineral lempung dan semen. Hasil serupa juga dipaparkan oleh Athanasopoulou (2016) yang menyatakan bahwa partikel lempung dan semen mengikat satu sama lain dan semakin lama akan membentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar sehingga akan mengurangi plastisitas dari tanah. Locat dkk. (dalam Chew dkk., 2004) berpendapat bahwa salah satu penyebab kondisi ini adalah air yang terperangkap pada pori intra-agregat. Air tersebut akan tetap meningkatkan kadar air pada tanah namun keberadaannya tidak benar-benar mempengaruhi kondisi tanah.

Menurunnya indeks plastisitas dapat dilihat pengaruhnya pada klasifikasi tanah dengan metode USCS seperti pada Gambar 4.3. Klasifikasi terkait indeks plastisitas dan sifat tanah oleh Jumikis (dalam Hardiyatmo, 2012) dapat dilihat sesuai dengan Tabel 4.4. Berdasarkan tabel tersebut, penambahan semen mengubah klasifikasi *clayshale* dari tanah berplastisitas tinggi menjadi berplastisitas rendah dan klasifikasi *siltstone* dari tanah berplastisitas sedang menjadi berplastisitas rendah.

Tabel 4.4 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah (Jumikis dalam Hardiyatmo, 2012)

PI	Sifat	Jenis tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 - 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

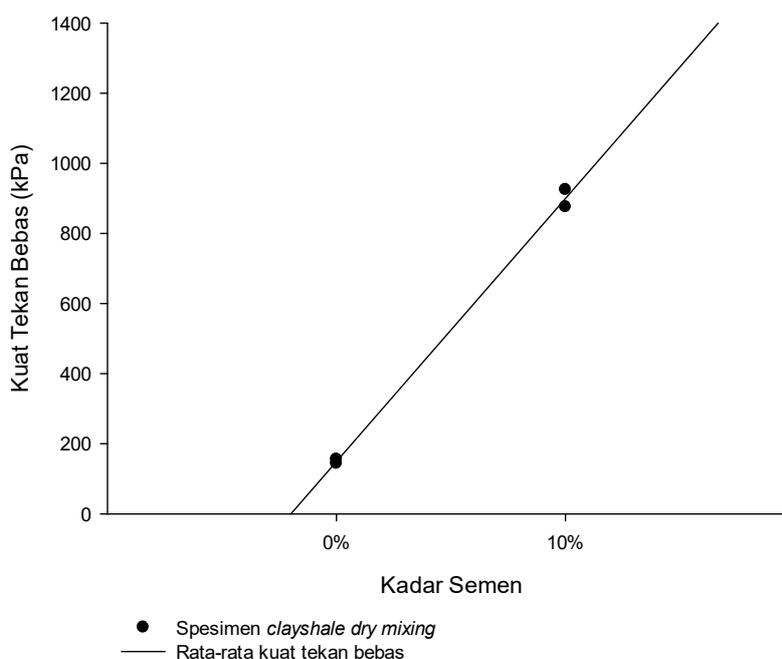


Gambar 4.3 Klasifikasi Tanah Dengan Metode USCS (ASTM, 2011)

4.6. Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas

Hubungan antara kadar semen dan kuat tekan bebas dapat dilihat pada Gambar 4.4 sampai Gambar 4.7. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan semen pada *clayshale* dan *siltstone* dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas. Peningkatan yang terjadi sangat signifikan dan dialami oleh kedua jenis tanah. Hasil-hasil dari penelitian yang dilakukan oleh Kang dkk. (2017), Sariosseiri dan Muhunthan (2009), dan Lee dkk. (2005) juga menunjukkan bahwa penambahan semen dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas. Semakin tinggi rasio perbandingan antara semen dan tanah pada campuran, maka jumlah pori di dalamnya akan berkurang dan meningkatkan kuat tekannya. (Lee dkk., 2005). Peningkatan kekuatan dari tanah yang distabilisasi dengan semen pada kondisi awal sebagian besar diakibatkan oleh reaksi hidrasi semen, sedangkan untuk peningkatan pada jangka panjang dalam kurun waktu tahunan disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara mineral lempung dan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen (Ho dkk., 2017).

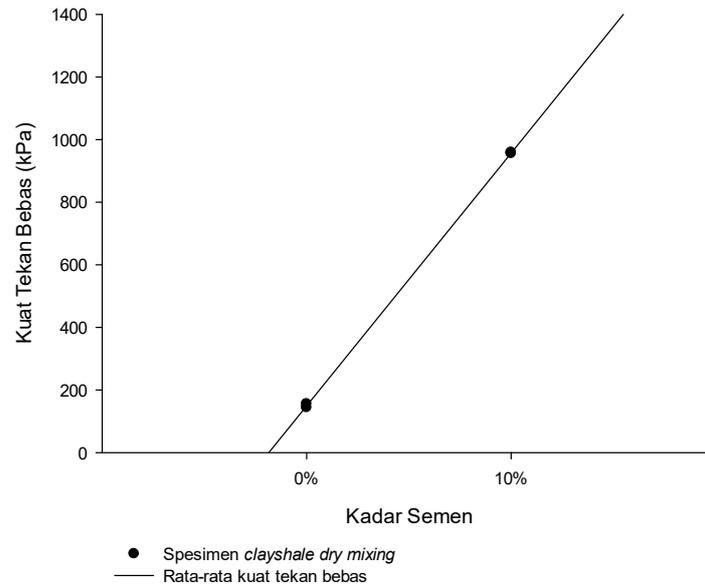
Dari hasil pengujian yang dilakukan, dapat dilihat bahwa penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi lebih efektif apabila diaplikasikan pada *siltstone* dibandingkan dengan *clayshale*. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kadar air pada *siltstone* yang lebih besar jika dibandingkan dengan *clayshale*. Kadar air yang lebih tinggi membuat reaksi hidrasi berlangsung lebih cepat dan merata. Perbandingan air pori dan jumlah semen sangat berpengaruh pada kekuatan dan karakteristik deformasi dari tanah yang distabilisasi semen, dikarenakan proses hidrasi yang terjadi merupakan hasil dari reaksi air pori dan semen ketika dilakukan pencampuran (Horpibulsuk dkk., 2005). Gartner dkk. (2002) menjelaskan bahwa hidrasi akan terus terjadi hingga tidak ada lagi air dan komponen semen untuk bereaksi atau tidak terdapat tempat untuk menempatkan produk hasil hidrasi



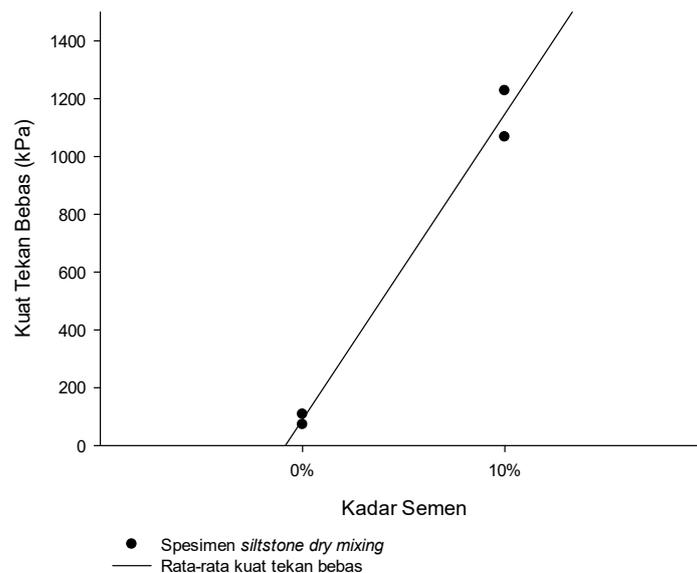
Gambar 4.4 Hubungan Kadar Semen dan Kuat Tekan Bebas *Clayshale Dry Mixing*

Stabilisasi tanah dengan menggunakan semen akan lebih sulit dilakukan pada tanah dengan butiran halus seperti lempung. Hal ini disebabkan tanah berbutir halus akan lebih susah untuk dicampurkan dengan semen dan dipadatkan, selain itu jumlah semen yang diperlukan untuk tanah berbutir halus juga lebih banyak sehingga kurang ekonomis (ACI, 2009). Faktor lain yang mungkin dapat mempengaruhi adalah plastisitas tanah. Berdasarkan hasil pengujian indeks

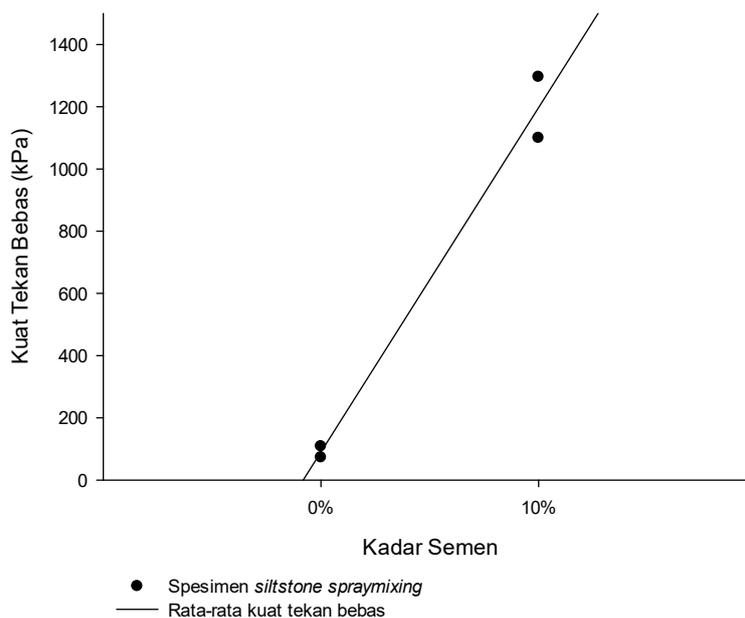
plastisitas, *clayshale* memiliki plastisitas yang lebih tinggi dibandingkan *siltstone*. Menurut Robbins dan Mueller; Dunlap dkk., dalam ACI (2009) hampir semua jenis tanah dapat distabilisasi dengan semen, kecuali tanah organik, tanah berplastisitas tinggi, dan tanah yang memiliki kadar sulfat sedang atau tinggi.



Gambar 4.5 Hubungan Kadar Semen dan Kuat Tekan Bebas *Clayshale Spray Mixing*



Gambar 4.6 Hubungan Kadar Semen dan Kuat Tekan Bebas *Siltstone Dry Mixing*



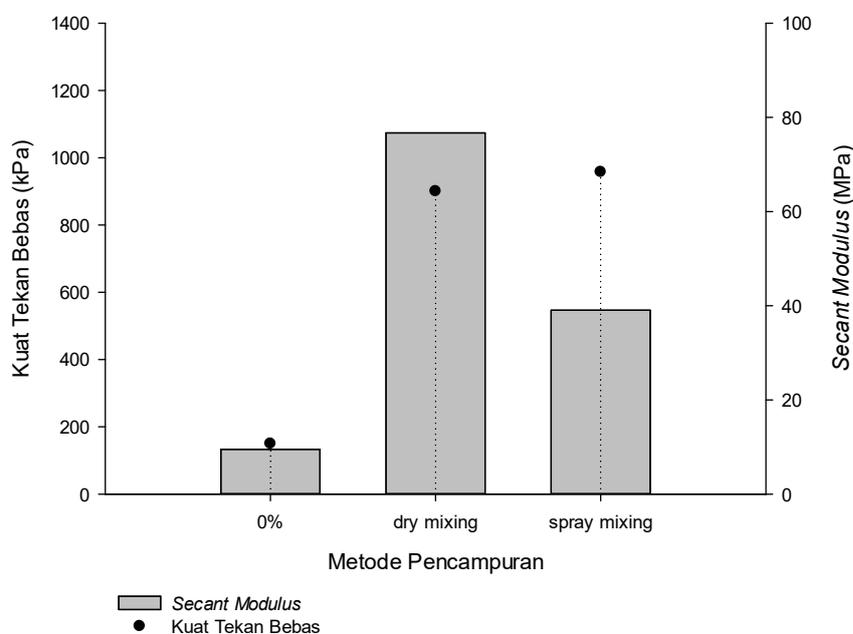
Gambar 4.7 Hubungan Kadar Semen dan Kuat Tekan Bebas *Siltstone Spray Mixing*

4.7. Pengaruh Metode Pencampuran Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas dan Secant Modulus

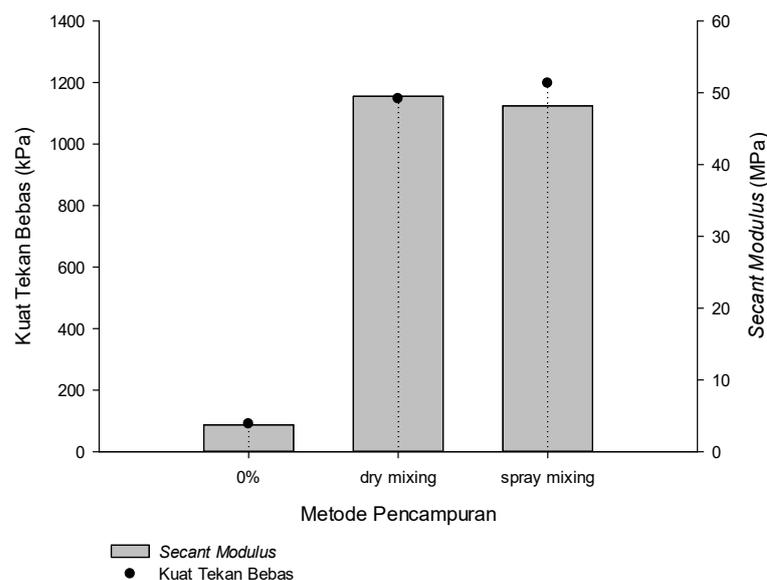
Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing* menghasilkan kuat tekan bebas yang lebih rendah dibandingkan dengan metode *spray mixing*. Perbedaan kuat tekan yang terjadi sebesar 57,029 kPa pada spesimen *clayshale* dan 50,014 kPa pada spesimen *siltstone*. Sebaliknya, nilai *secant modulus* spesimen yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing* lebih tinggi dibandingkan dengan metode *spray mixing*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun menghasilkan sampel yang lebih getas, namun kuat tekan sampel *dry mixing* tidak sekuat sampel *spray mixing*. Hasil serupa juga ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Pakbaz dan Farzi (2015) yang meneliti penggunaan pasta semen (*wet mixing*) dan semen dalam bentuk bubuk (*dry mixing*). Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Pakbaz dan Farzi (2015) metode *spray mixing* akan menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi, namun seiring berjalannya waktu pemeraman, perbedaan kuat tekan antara *spray mixing* dan *dry mixing* akan semakin mengecil. Dapat disimpulkan bahwa spesimen akan mengalami proses hidrasi yang lebih cepat dengan metode *spray mixing*. Pembentukan ikatan antar partikel lempung dan material hasil hidrasi terjadi lebih

cepat pada *spray mixing*, namun nilai kuat tekan yang dicapai kemungkinan tidak akan berbeda terlalu jauh. Pengujian kuat tekan bebas pada penelitian ini dilakukan saat spesimen berumur 7 hari, sehingga laju pembentukan kekuatan dari hidrasi awal sangat menentukan nilai kuat tekan. Hal tersebut yang membuat spesimen dengan metode *spray mixing* memiliki kuat tekan bebas yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen metode *dry mixing*.

Gartner dkk. (2002) menjelaskan tahapan awal hidrasi berupa reaksi cepat ketika semen bertemu air, pada fase ini terjadi hidrolisis pada permukaan dan pelepasan ion pada larutan. Reaksi hidrasi melambat ketika semen dan air dalam proses pencampuran kemudian menghasilkan lapisan hidrat pada permukaan C_3S . Dengan menggunakan metode *spray mixing* reaksi hidrasi tersebut dapat dioptimalkan dengan langsung mencampurkan semen dan air menjadi satu larutan (pasta semen). Sedangkan pada metode *dry mixing* proses ini terhambat karena air pada campuran merupakan air pori dan tidak berkontak langsung dengan butiran semen. Metode pencampuran *spray mixing* juga akan menghasilkan struktur tanah-semen yang lebih homogen dikarenakan fase pencampuran yang lebih lama dan keberadaan air yang diaplikasikan pada semen (Egorova dkk., 2017).



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Metode Pencampuran dengan *Secant Modulus* dan Kuat Tekan Bebas pada *Clayshale*

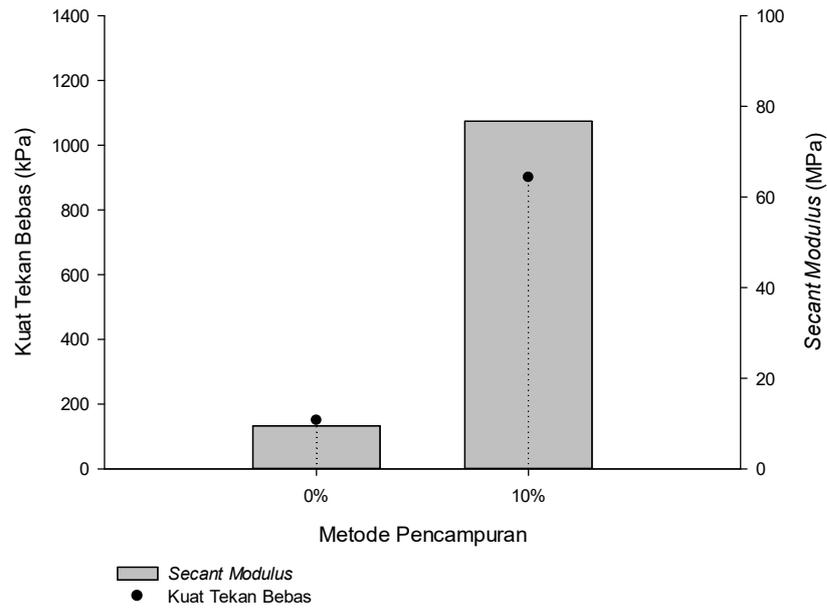


Gambar 4.9 Grafik Hubungan Metode Pencampuran dengan *Secant Modulus* dan Kuat Tekan Bebas pada *Siltsone*

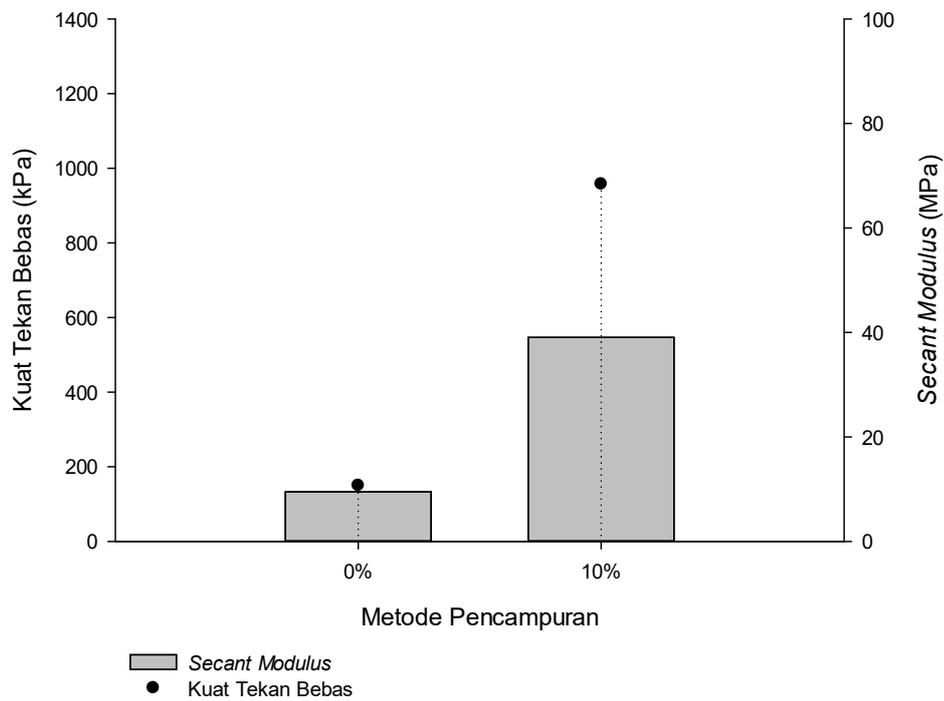
4.8. Pengaruh Penambahan Semen Terhadap *Secant Modulus*

Secant modulus digunakan sebagai parameter untuk menentukan kegetasan atau keplastisan tanah. Seluruh spesimen dengan jenis tanah dan metode pencampuran yang berbeda mengalami peningkatan nilai *secant modulus* ketika nilai kuat tekan bebas mengalami kenaikan. Hubungan besar peningkatan nilai *secant modulus* dan kuat tekan bebas memiliki karakteristik yang berbeda pada tiap metode pencampuran. Pada metode *wet mixing* nilai kuat tekan bebas yang dicapai lebih besar, namun nilai *modulus secant* yang dihasilkan tidak sebesar spesimen metode *dry mixing*.

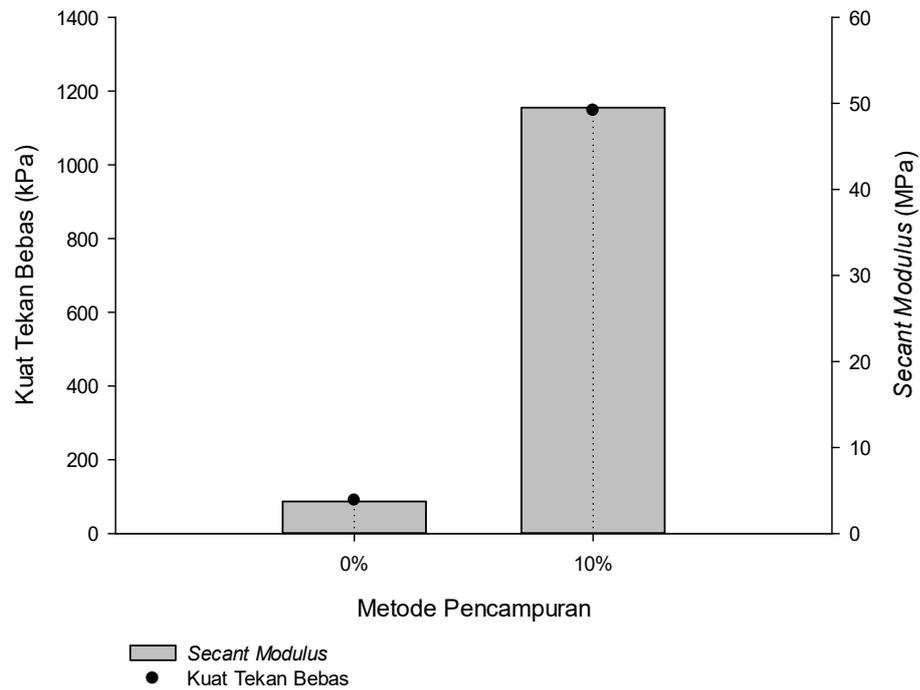
Penambahan semen dan kapur dapat menurunkan potensi pengembangan dan indeks plastisitas, serta meningkatkan modulus elastisitas, indeks durabilitas, dan kuat geser dari tanah secara signifikan (Lo, Wardani; Sharma dkk., dalam Bagheri dkk., 2014). Menurut Sariosseiri dan Muhunthan (2009), Pakbaz dan Alipour (2012), dan Eskisar (2015), semakin banyak jumlah semen yang ditambahkan, maka spesimen akan mampu menerima beban yang lebih besar namun berperilaku semakin getas. Gambar 4.8 sampai Gambar 4.10, dan Gambar 4.11 menunjukkan hubungan tersebut meskipun besar kenaikan variatif; namun kecenderungan pada nilai *secant modulus* tetap mengalami peningkatan.



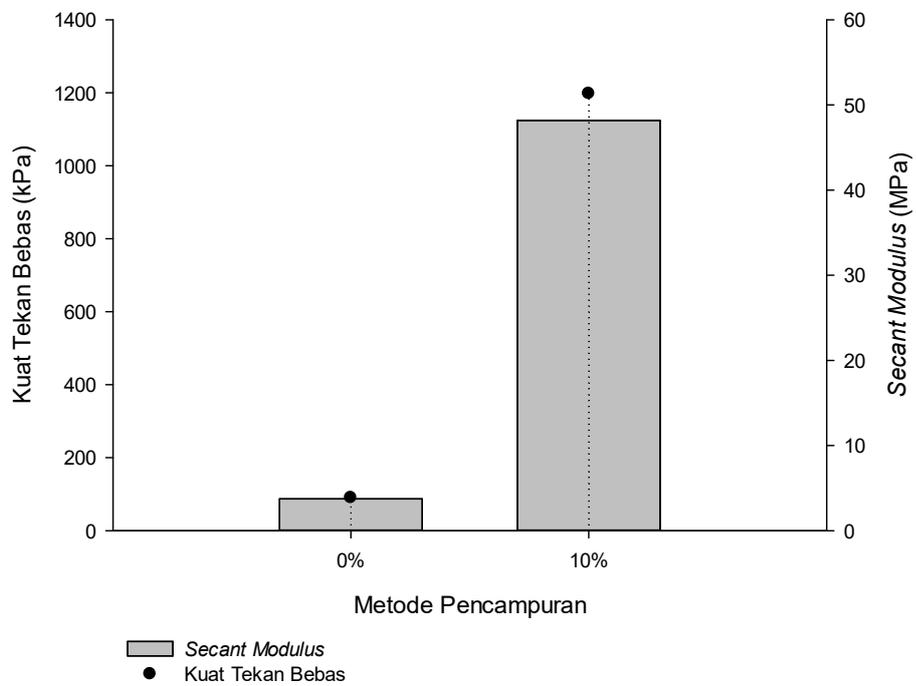
Gambar 4.10 Hubungan Kadar Semen, Kuat Tekan Bebas, dan *Secant Modulus* *Clayshale Dry Mixing*



Gambar 4.11 Hubungan Kadar Semen, Kuat Tekan Bebas, dan *Secant Modulus* *Clayshale Spray Mixing*



Gambar 4.12 Hubungan Kadar Semen, Kuat Tekan Bebas, dan *Secant Modulus* *Siltstone Dry Mixing*



Gambar 4.13 Hubungan Kadar Semen, Kuat Tekan Bebas, dan *Secant Modulus* *Siltstone Spary Mixing*

4.9. Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Brittleness Index

Brittleness Index adalah parameter yang dapat digunakan untuk mengukur penurunan tegangan secara tiba-tiba setelah benda uji mencapai tegangan tertinggi. (Sariosseiri dan Muhunthan, 2009). Semakin kecil nilai I_B maka keruntuhan akan bersifat lebih daktail (Li dkk., 2014). Nilai I_B memiliki kolerasi dengan nilai *secant modulus*. Semakin tinggi nilai I_B maka nilai E_{50} akan semakin tinggi pula. Berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh Eskisar dkk. (2014) penambahan semen sebanyak 5% akan mengubah perilaku benda uji dari daktail menjadi getas dan penambahan sebanyak 10% akan mengubah benda uji menjadi sangat getas. Hasil perhitungan nilai I_B berdasarkan grafik hubungan tegangan dan regangan dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai *Brittleness Index* Benda Uji *Clayshale* dan *Siltstone*

Spesimen	<i>Brittleness Index</i>	
	<i>Clayshale</i>	<i>Siltstone</i>
0%	0.575	0,477
<i>Dry Mixing</i>	0.595	0,607
<i>Spray Mixing</i>	0.708	0,741