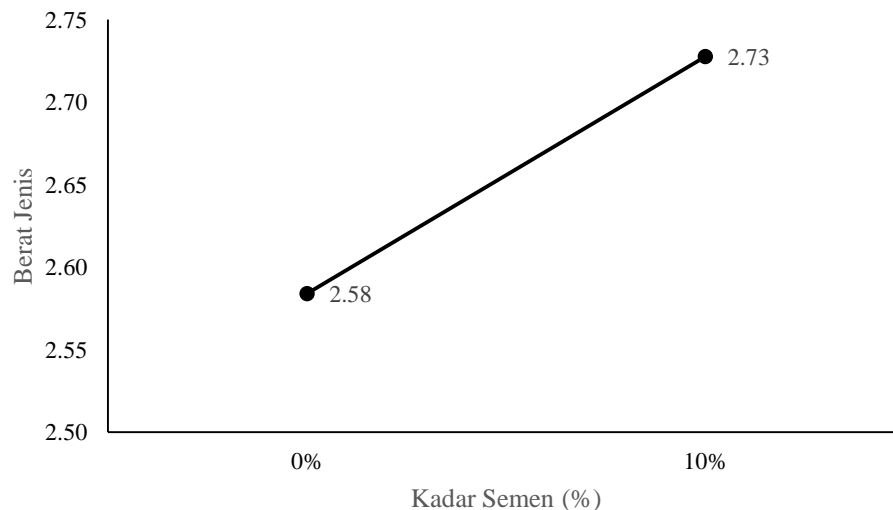


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Berat Jenis

Hasil dari pengujian berat jenis disajikan dalam gambar 4.1. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai berat jenis meningkat seiring meningkatnya kadar semen yang dicampurkan. Benda uji dengan kadar semen 0% memiliki nilai berat jenis sebesar 2,58 sedangkan benda uji dengan kadar semen 10% mengalami peningkatan nilai berat jenis 0,15 lebih besar dibandingkan benda uji tanpa semen, menjadi 2,73.



Gambar 4.1 Hubungan berat jenis dan kadar semen.

Benda uji dengan campuran kadar semen 10% memiliki nilai berat jenis lebih besar disebabkan telah terjadinya reaksi kimia yang memicu terjadinya flokulasi atau penggumpalan partikel tanah karena berinteraksi dengan semen sehingga menghasilkan ikatan partikel tanah dengan semen yang menghasilkan ukuran butiran lebih besar dibandingkan dengan ukuran butiran tanah tanpa semen. Ukuran partikel tanah-semen yang lebih besar menyebabkan berat yang dimiliki juga lebih besar sehingga menghasilkan nilai berat jenis yang lebih tinggi. Meningkatnya kadar semen yang ditambahkan menyebabkan berat volume tanah meningkat sehingga nilai berat jenis juga meningkat (Djelloul, dkk., (2017)).

4.2. Hasil Pengujian *Atterberg Limit*

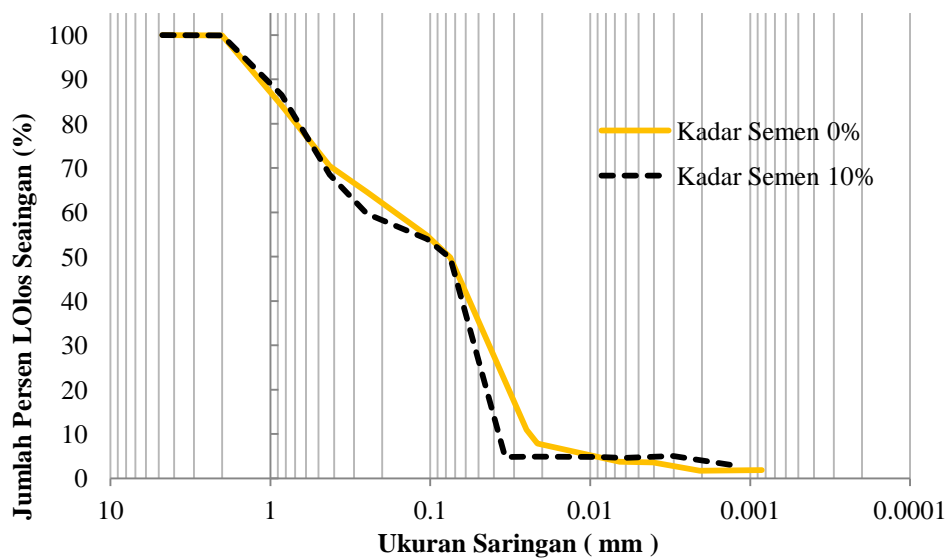
Hasil pengujian *Atterberg Limit* yang meliputi batas cair, batas plastis, batas susut dan indeks plastisitas, disajikan dalam tabel 4.1. Beberapa penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa penambahan semen pada tanah menurunkan nilai batas cair, indeks plastisitas dan meningkatkan nilai batas plastis dan batas susut (Sariosseiri dan Muhunthan, 2009), (Bayat, dkk., 2013). Penurunan nilai indeks plastisitas yang terjadi disebabkan oleh reaksi yang terjadi antara mineral lempung dan semen, yakni flokulasi dan aglomerasi, yang menghasilkan ikatan antara partikel berdekatan, sehingga terjadi penurunan plastisitas tanah. Penurunan batas cair dan indeks plastisitas, serta peningkatan nilai batas susut disebabkan karena terjadinya hidrasi. Ketika semen dicampurkan dengan tanah, hidrasi sistem semen-air dan sebuah rangkaian reaksi sementasi dalam tanah-semen terjadi. Adanya semen menyebabkan terjadinya reaksi *pozzolanic* senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dari semen bercampur dengan tanah dan air membuat rongga pori partikel tanah terisi semen dan membuat tanah sulit ditembus air sehingga sifat plastisnya cenderung turun (Andriani dkk., 2012).

Tabel 4.1. Hasil Pengujian *Atterberg Limit*

Variabel	Hasil	
	Kadar semen 0%	Kadar semen 10%
Batas cair (LL)	37,5%	34%
Batas plastis (PL)	21,99%	33,44%
Batas susut (SL)	31,64%	41,83%
Indeks plastisitas (PI)	15,51%	0,56%

4.3. Hasil Pengujian Distribusi Ukuran Butiran

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran tanah yang disajikan dalam kurva pada gambar 4.2 berikut ini. Pada kurva, dapat diamati bahwa distribusi ukuran butiran tanah tanpa semen dan tanah dengan kadar semen 10% relatif sama. Namun pada beberapa ukuran saringan, tanah tanpa semen cenderung memiliki persentase berat lolos lebih besar dibandingkan dengan tanah campuran semen.

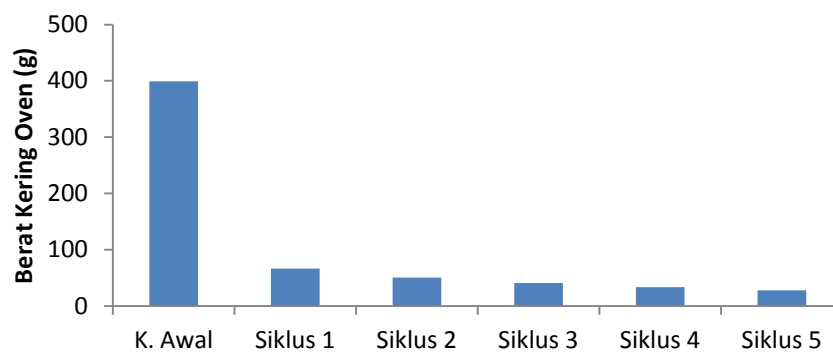


Gambar 4.2 Gradasi ukuran butiran tanah.

Hal tersebut disebabkan adanya proses sementasi pada tanah akibat adanya interaksi dengan senyawa kimia yang terdapat dalam semen sehingga memicu terjadinya reaksi kimia menghasilkan ikatan antara tanah dan semen. Ikatan tersebut menyebabkan ukuran partikel tanah dengan semen menjadi lebih besar dari ukuran partikel tanah biasa.

4.4. *Slake Durability Index (I_d) Pada Mudrock Tanpa Semen*

Pengujian *Slake Durability* pada *Mudrock* tanpa semen dilakukan selama 5 hari dengan perlakuan siklus pembasahan dan pengeringan (*drying-wetting*) setiap harinya. Dari pengujian ini diperoleh grafik hubungan kondisi *Mudrock* terhadap perubahan beratnya. Pengaruh perlakuan siklus pembasahan dan pengeringan diamati dari perubahan berat kering oven benda uji setelah mengalami siklus. Berdasarkan grafik pada gambar 4.3 dapat diketahui bahwa berat kering oven benda uji *mudrock* tanpa semen berkurang secara signifikan dari kondisi awal ke kondisi setelah mendapat perlakuan siklus yang pertama. Sementara itu, dari siklus pertama ke siklus yang selanjutnya berat kering oven *mudrock* tanpa semen juga mengalami penurunan namun tidak secara drastis sebagaimana yang terjadi pada kondisi setelah siklus pertama. Berat kering oven berkurang karena butiran fragmen yang lapuk akan terendapkan.



(a)



(b)

Gambar 4.3 Perubahan berat kering oven (a) benda uji drum kanan dan (b) benda uji drum kiri *Mudrock* tanpa semen.

Berat kering oven pada *mudrock* tanpa semen mengalami penurunan drastis dari kondisi awal ke kondisi setelah mengalami siklus pembasahan dan pengeringan pertama. Hal ini dikarenakan *mudrock* yang mengandung mineral lempung memiliki sifat seperti *shales* yang sensitif terhadap air dan secara umum partikelnya tidak terikat dengan baik sehingga mengurangi durabilitasnya. Kontak fragmen dengan air menyebabkan terjadinya adsorpsi, yakni proses melekatnya molekul air pada permukaan butiran tanah. Mineral lempung yang terdapat dalam fragmen *mudrock* menyebabkan terjadinya pertukaran kation dan ion ketika terjadi adsorpsi. Hal tersebut menyebabkan fragmen mengalami pengembangan (*swelling*) saat kondisi basah. Pengembangan yang terjadi pada fragmen yang relatif kecil menyebabkan partikel fragmen merenggang dan akhirnya fragmen hancur. Sensitivitas terhadap air yang dimiliki oleh *mudrock* menyebabkan partikel antar butirannya kehilangan tegangan ketika mengalami kontak dengan air. Ketika batuan terendam, meniskus air diantara pori *mudrock* meningkat, yang

menyebabkan menurunnya tegangan permukaan pada kontak antar butiran. Dengan mekanisme pengujian yang menyebabkan fragmen *mudrock* terendam air dalam jangka waktu tertentu memungkinkan untuk tingkat kejenuhan fragmen meningkat. Seiring meningkatnya tingkat kejenuhan *mudrock*, yang berarti semakin banyak air yang masuk ke pori batuan, maka lama kelamaan tegangan antar partikel butiran hilang, kohesinya pun berkurang dan menyebabkan fragmen lapuk dan terdegradasi.

Pada kondisi perlakuan siklus pembasahan dan pengeringan pertama, berat kering oven benda uji menurun sangat drastis sedangkan hal berbeda terjadi pada siklus setelahnya. Hal ini terjadi disebabkan kontak awal yang terjadi antara fragmen *mudrock* dengan mekanisme pengujian yang melibatkan kontak dengan air, perputaran drum, dan gesekan antar fragmen lebih dominan mempengaruhi bagian permukaan fragmen menyebabkan sebagian besar dari bagian terluar fragmen terdegradasi sehingga menyisakan bagian inti fragmen yang relatif lebih kokoh. Fragmen yang terseleksi dari siklus pertama merupakan bagian dari fragmen awal yang tahan terhadap perlakuan siklus yang diberikan atau bisa dikatakan lebih kokoh. Oleh sebab itu, tren berat kering oven yang ditunjukkan pada siklus kedua sampai dengan siklus kelima cenderung lebih seragam.

Data hasil pengujian berupa berat kering oven *mudrock* tanpa semen pada Tabel 4.2 menunjukkan penurunan signifikan pada benda uji dari kondisi awal sampai dengan setelah mengalami siklus pembasahan dan pengeringan.

Tabel 4.2 Berat kering oven tanah *Mudrock* tanpa semen

Kondisi Benda Uji	Berat Kering Oven (g)	
	Kanan	Kiri
Awal	399	382
Setelah siklus 1	66.5	7.18
Setelah siklus 2	50.94	3.29
Setelah siklus 3	41.35	2.04
Setelah siklus 4	33.95	1.46
Setelah siklus 5	28.14	0.95

Berdasarkan data berat kering oven *mudrock* tanpa semen pada Tabel 4.1, maka diperoleh nilai I_d pada siklus 2 benda uji drum kiri berdasarkan persamaan 2.1, sebagai berikut :

$$C = 1603 \text{ g}$$

$$B = 1985 \text{ g}$$

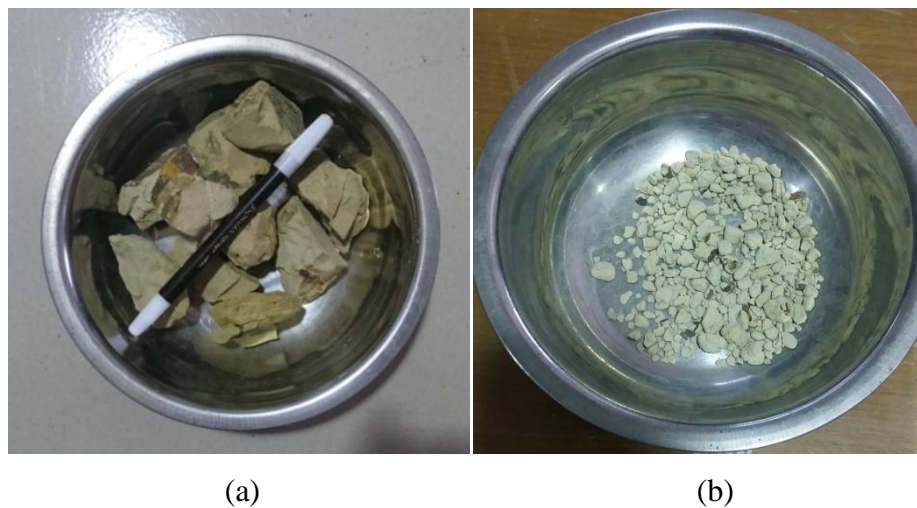
$$W_F = 1606,29 \text{ g}$$

$$I_d(2) = [(1606,29 - 1603)/(1985 - 1603)] \times 100$$

$$I_d(2) = 0,86\%$$

Demikian juga untuk nilai I_d pada siklus 3, 4, dan 5 berturut-turut adalah 0.53%, 0.38%, dan 0.25%. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin lama *mudrock* diberi perlakuan siklus, yang berarti semakin lama pula *mudrock* berinteraksi dengan unsur-unsur yang menyebabkan pelapukan, maka durabilitasnya pun semakin menurun mendekati nol (*non-durable*). Berdasarkan nilai I_d tersebut, maka durabilitas benda uji diklasifikasikan sebagai *very low*.

Gambar 4.4 menunjukkan benda uji tanpa semen pada drum kanan dan drum kiri, pada kondisi awal dan kondisi setelah siklus ke-5.

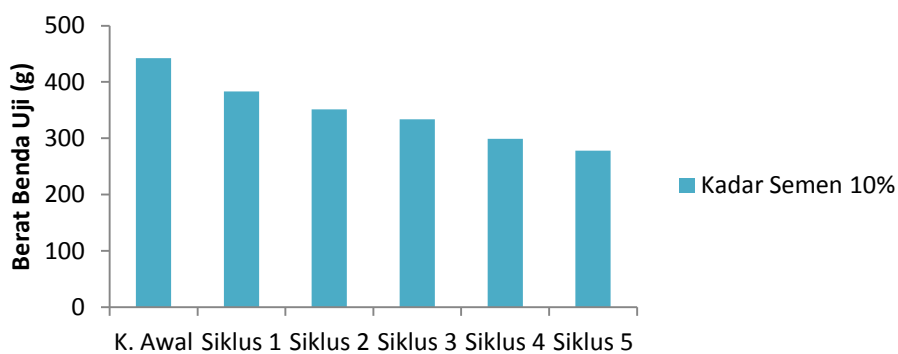


Gambar 4.4 Tampilan (a) kondisi awal dengan (b) kondisi setelah siklus kelima pengujian *slake durability mudrock* tanpa penambahan semen.

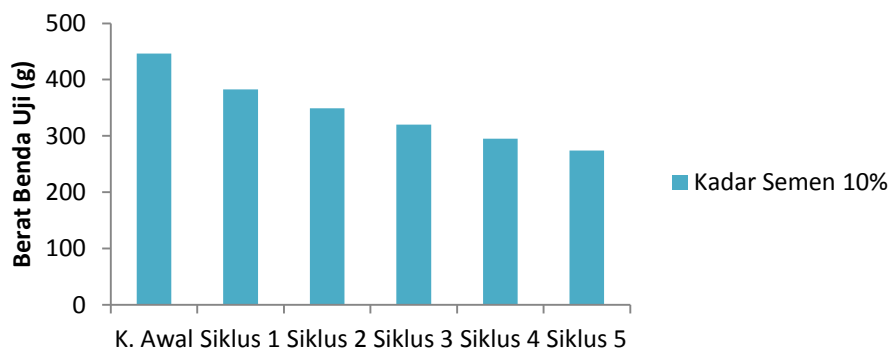
4.5. *Slake Durability Index (I_d) Mudrock Dengan Penambahan Semen*

Pengujian *Slake Durability* pada *Mudrock* dengan penambahan semen 10% dilakukan selama 5 hari dengan perlakuan siklus pembasahan dan pengeringan

(*drying-wetting*) setiap harinya. Dari pengujian ini diperoleh grafik hubungan kondisi *mudrock* terhadap perubahan beratnya. Berdasarkan grafik pada gambar 4.5 dapat diketahui bahwa berat benda uji semakin berkurang seiring dengan semakin lamanya siklus pembasahan dan pengeringan diberikan. Namun, penurunan berat yang terjadi pada *Mudrock* dengan penambahan semen lebih teratur selisih pengurangan beratnya jika diamati dari berat kering oven benda uji pada kondisi awal tanah ke kondisi setelah mengalami siklus pembasahan dan pengeringan. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh semen terhadap ikatan partikel *mudrock* yang menyebabkan durabilitasnya meningkat.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Perubahan berat kering oven (a) benda uji drum kanan dan (b) benda uji drum kiri *Mudrock* dengan penambahan semen 10%.

Sebagaimana dijelaskan bahwa adanya semen memicu terjadinya reaksi antara senyawa kimia dalam semen dan partikel tanah. Reaksi kimia yang terjadi antara Kalsium Hidroksida dalam semen dan Silika serta Alumina sebagai mineral lempung yang terdapat dalam tanah menyebabkan perubahan pada struktur tanah

dalam jangka waktu singkat. Perubahan yang terjadi adalah flokulasi, yakni penggumpalan partikel tanah karena reaksi kimia. Reaksi kimia tersebut menyebabkan senyawa pengikat dari semen mengikat partikel-partikel tanah, sehingga terjadi pengakuan atau pengerasan pada tanah untuk jangka waktu yang lama. Pengerasan menyebabkan benda uji lebih tahan terhadap faktor-faktor pelapukan. Semen yang juga melapisi permukaan batuan, menyebabkan fragmen cenderung lebih kedap air sehingga ketika terendam dan berinteraksi dengan air, air tidak terlalu meresap ke dalam fragmen dan sifat sensitif mineral lempung terhadap air tidak sepenuhnya memberi pengaruh. Oleh karena itu, fragmen cenderung lebih baik durabilitasnya dibandingkan dengan benda uji tanpa semen. Berat kering oven yang tertahan dari tiap siklusnya pun lebih banyak dan stabil daripada benda uji tanpa semen.

Data hasil pengujian berupa berat kering oven *mudrock* dengan penambahan semen 10% pada Tabel 4.3 menunjukkan penurunan yang lebih stabil dan teratur pada benda uji.

Tabel 4.3 Berat kering oven benda uji dengan penambahan kadar semen 10%

Kondisi Benda Uji	Berat Kering Oven (g)	
	Kanan	Kiri
Awal	442.16	446.55
Setelah siklus 1	383.08	382.66
Setelah siklus 2	351.26	349.05
Setelah siklus 3	333.68	320.08
Setelah siklus 4	299.08	295.28
Setelah siklus 5	277.97	274.05

Berdasarkan data berat kering oven tanah *mudrock* dengan penambahan semen 10% pada Tabel 4.2, maka diperoleh nilai I_d pada siklus 2 benda uji drum kiri berdasarkan persamaan 2.1, sebagai berikut :

$$C = 1603 \text{ g}$$

$$B = 2049,55 \text{ g}$$

$$W_F = 1952,05 \text{ g}$$

$$I_d(2) = \left[\frac{(1952,05 - 1603)}{(2049,55 - 1603)} \right] \times 100$$

$$I_d(2) = 78.17\%$$

Demikian juga untuk nilai I_d pada siklus 3, 4, dan 5 berturut-turut adalah 71.68%, 66.12%, dan 61.37%. Berdasarkan nilai I_d tersebut, maka durabilitas benda uji dengan semen diklasifikasikan sebagai *medium*.

Perbedaan yang terjadi antara nilai I_d *mudrock* tanpa semen dan *mudrock* dengan kadar semen 10% tidak lepas dari pengaruh semen yang ditambahkan. Semen memberikan peningkatan durabilitas, menyebabkan faktor-faktor pelapukan yang meliputi udara, air, panas, dan faktor lainnya, tidak mendegradasi partikel *mudrock* secara signifikan. Ketahanan terhadap pelapukan terlihat sangat jelas meningkat setelah penambahan semen. Nilai I_d siklus ke-5 *mudrock* tanpa semen adalah 0,25% sementara nilai I_d siklus ke-5 *mudrock* dengan penambahan semen menunjukkan nilai 61,37%. Artinya terjadi peningkatan angka durabilitas dengan selisih 61,12%. Dengan hasil tersebut, maka dapat direkomendasikan untuk penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi *mudrock*. Gambar 4.6 menunjukkan benda uji *mudrock* dengan penambahan semen 10% pada kondisi awal dan kondisi setelah siklus ke-5. Dapat diamati secara visual bahwa benda uji lebih utuh daripada benda uji tanpa semen, menunjukkan durabilitas yang lebih baik.



Gambar 4.6 Benda uji dengan semen 10% (a) kondisi awal dan (b) kondisi setelah siklus ke-5.

4.6. Pengaruh pengujian *Slake Durability* terhadap batuan

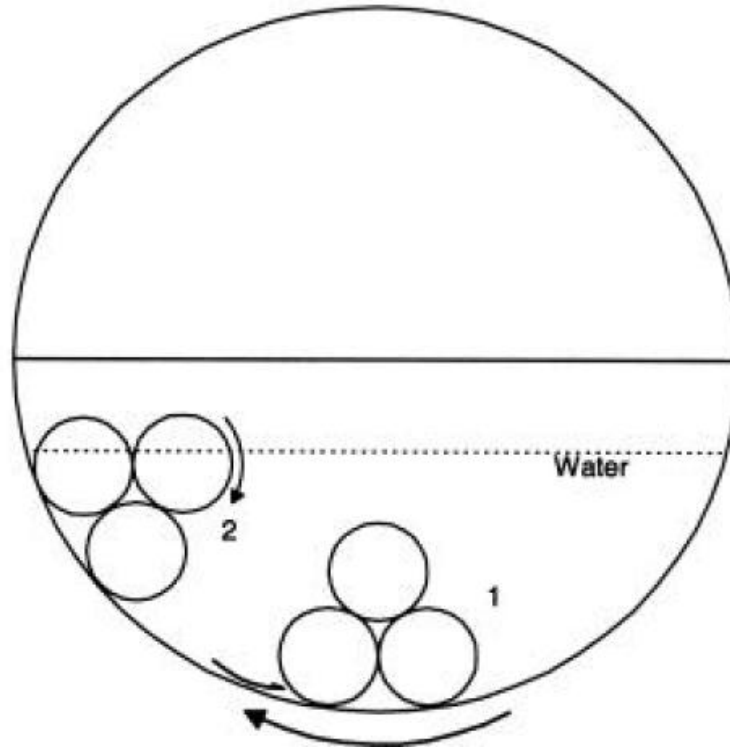
Batuan sedimen yang mengandung mineral lempung memiliki karakteristik dan perilaku sebagaimana tanah lempung pada umumnya. Namun, dalam beberapa kasus tertentu menunjukkan perilaku berbeda ditunjukkan oleh batuan sedimen lempung seperti *clay shale* dan *mudrock*. Tampilan visual *mudrock* yang relative kuat dan kokoh, tidak merepresentasikan baiknya tingkat durabilitas batuan tersebut. Pengaruh siklus pembasahan dan pengeringan berdasarkan pengujian *slake durability* menunjukkan pengaruh yang cukup besar pada proses pelapukan *mudrock*.

Agustawijaya (2004) menjelaskan bahwa pada batuan yang mengandung mineral lempung, pertukaran kation dan ion terjadi dikarenakan adanya proses adsorpsi air, yakni proses melekatnya molekul air pada permukaan batuan. Proses ini menyebabkan batuan mengalami pengembangan (*swelling*) saat kondisi basah. Dengan durasi pengujian yang hanya 10 menit, proses pembasahan selama pengujian hanya akan mempengaruhi bagian permukaan batuan, sehingga pelapukan yang terjadi secara dominan adalah di bagian permukaan batuan.

Hal tersebut sesuai dengan hasil pengujian yang menunjukkan adanya berat kering tersisa dari spesimen yang diuji, yang diperkirakan merupakan bagian inti dari batuan tersebut yang tidak terpapar siklus pembasahan dan pengeringan sebagaimana bagian permukaan batuan. Ketika batuan dalam kondisi semakin terjenuhkan, meniscus air pada pori batuan meningkat yang menyebabkan berkurangnya tegangan kapiler pada ikatan butiran sehingga menyebabkan retak. Perlu diketahui bahwa dalam pengujian *slake durability* tidak hanya siklus pembasahan dan pengeringan yang memberikan pengaruh pelapukan pada batuan, tetapi juga mekanisme perputaran drum dan gesekan batuan dengan permukaan dalam drum juga memberikan pengaruh degradasi terhadap benda uji.

Ketika drum berputar, tiga mekanisme terjadi secara bersamaan yang dimulai dengan menggelincirnya batuan di dalam drum. Pada gambar 4.7, perputaran drum menyebabkan batuan berpindah dari posisi 1 ke posisi 2 dan selama proses tersebut, batuan akan memberikan perlawanan geser terhadap permukaan bagian dalam drum. Pada posisi 2 dengan ketinggian tertentu

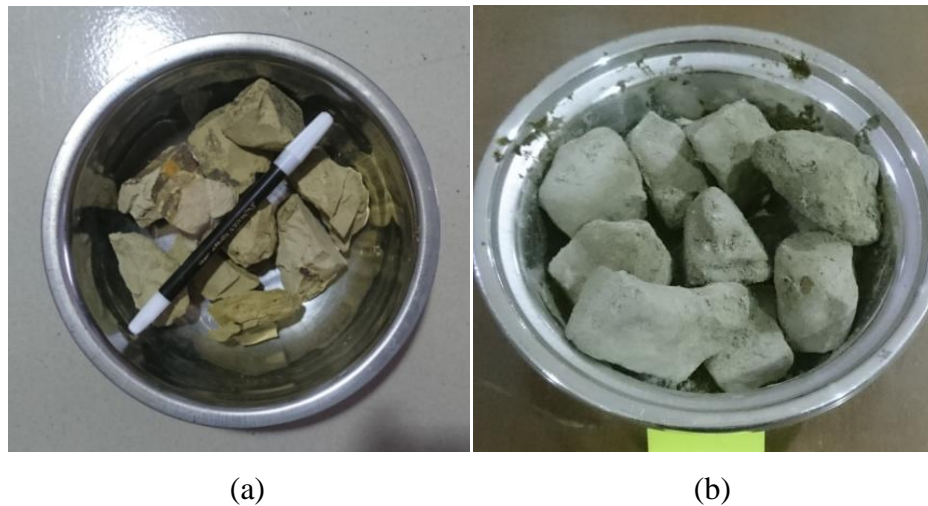
menyebabkan perlawanan geser batuan tidak mampu melawan gaya dorong ke dasar drum akibat berat batuan dan gravitasi sehingga batuan kembali ke posisi 1.



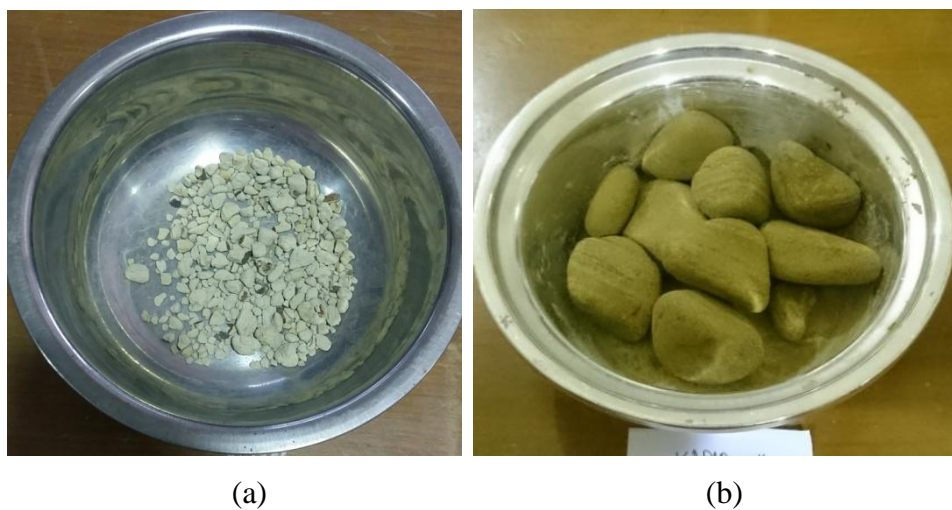
Gambar 4.7 Gerakan batuan saat proses rotasi di dalam drum
(Agustawijaya, 2004)

Gesekan yang terjadi pada fragmen, sedikit banyak memberikan pengaruh pengikisan terhadap bagian permukaan fragmen meskipun tidak terlalu memberikan pengaruh pelapukan terhadap benda uji. Proses pengeringan dengan oven pun cukup menjadi faktor pelapukan benda uji karena proses pengeringan dengan oven berbeda dengan proses pengeringan secara alami. Temperatur oven yang bisa diatur konstan berbeda dengan temperatur ruangan yang cenderung tidak stabil. Kondisi fragmen yang basah sebelum dikeringkan dengan oven, menyebabkan ruang pori fragmen mendadak berongga karna pemanasan atau pengeringan menggunakan oven menyebabkan air yang melekat di dalam fragmen menguap secara mendadak dengan energi panas yang relatif besar sehingga keadaan fragmen untuk masuk ke siklus selanjutnya benar-benar kering dan porinya berongga setelah ditinggalkan air yang menguap. Kondisi ini

menyebabkan fragmen lebih mudah lapuk ketika terendam di siklus selanjutnya mengingat fragmen mengandung mineral lempung yang sensitif terhadap interaksi mendadak dengan air. Hal tersebut cukup mempengaruhi proses pelapukan benda uji tanpa semen karena kontak fragmen dengan air terjadi secara langsung sementara benda uji dengan semen tidak mengalami kontak secara langsung dengan air karena adanya semen yang bersifat *impermeable* atau kedap air, sehingga lapisan permukaan fragmen lebih terlindungi dari kontak langsung dengan air. Dapat dilihat pada gambar 4.8 perbandingan kondisi awal dan kondisi akhir kedua benda uji.



Gambar 4.8 Kondisi awal benda uji (a) tanpa semen dan (b) dengan semen 10%.



Gambar 4.9 Kondisi akhir benda uji (a) tanpa semen dan (b) dengan semen 10%.