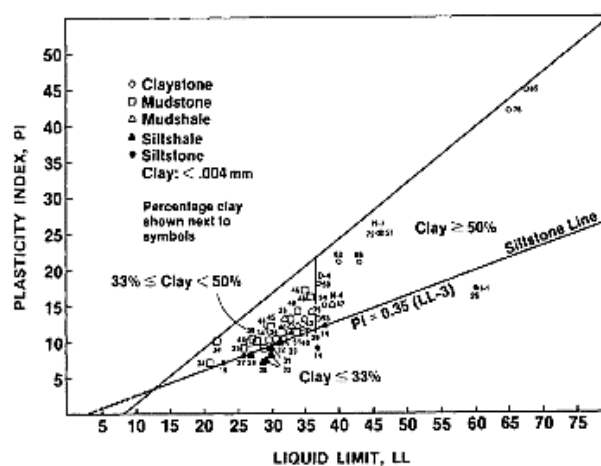


BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA PIKIR

2.1. Kajian Pustaka

Clay shale merupakan salah satu jenis batuan sedimen, dimana pada awalnya antar butiran sedimen tidak ada ikatan dan bersifat lepas. Pengerasan (*diagenesis*) pada batuan sedimen terjadi, akibat pemadatan oleh tekanan, sementasi, dan pengkristalan (Verhoef, 1989). Batuan sedimen yang disusun oleh butiran halus sering juga disebut *mud rock*, dimana pengelompokannya didasarkan pada jumlah fraksi lempung dengan diameter butiran kurang dari 0,004 mm. Sebutan *silt stone* digunakan untuk *mud rock* dengan kadar lempung kurang dari 33%, *mud stone* untuk kadar lempung antara 33% - 50%, dan *clay stone* untuk lebih dari 50%. Sebutan tersebut digunakan untuk kondisi tidak berlapis, sedangkan pada kondisi berlapis-lapis penyebutan yang digunakan adalah *silt shale*, *mud shale* dan *clay shale* (Dick and Shakoor, 1992). Memisahkan butiran halus pada *clay shale* tidak mudah dan hasilnya tidak memuaskan, sehingga tidak banyak dilakukan (Bell, 1983). Metode pendekatan untuk pengelompokan *mud rock* dapat dilakukan berdasarkan nilai batas-batas konsistensinya (Dick and Shakoor, 1992), yaitu batas cair (LL) dan indeks plastisitasnya (PI). Pengelompokan berdasarkan LL dan PI dilakukan menggunakan grafik pada Gambar 2.1.



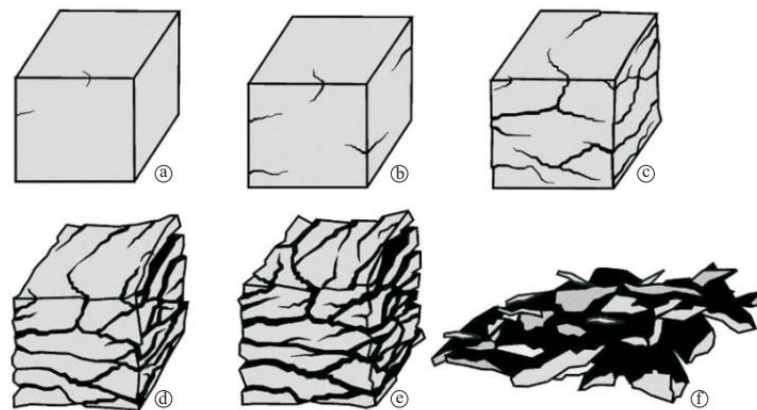
Gambar 2.1 Pengelompokan *mud rock* berdasarkan nilai LL dan PI (Dick and Shakoor, 1992).

2.1.1. *Clay shale*

Permasalahan pada *clay shale* dan batuan sedimen pada umumnya adalah pelapukan yang mengakibatkan degradasi. Pada umumnya tanah lempung kaku yang terendam air akan mengalami proses degradasi kuat dukung (Skempton, 1964), namun proses ini memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi sangat lunak, yaitu antara 16 sampai 80 tahun (Skempton, 1977), namun *clay shale* pada kondisi terbuka akan mengalami degradasi lebih cepat. Pada kondisi terbuka *clay shale* akan terpapar oleh perubahan cuaca dan mengalami siklus kering-basah. Proses pengeringan pada *clay shale* akan berdampak dimulainya proses degradasi (Sadisun et al., 2010; Alatas et al., 2015), namun pengaruh pengeringan ini belum terlalu besar (Alatas and Simatupang, 2017). Proses pembasahan setelah pengeringan akan menyebabkan proses degradasi berlangsung lebih cepat (Stark and Duncan, 1991; Sadisun et al., 2010; Alatas and Simatupang, 2017), dan proses pengeringan-pembasahan yang berulang akan menyebabkan degradasi semakin cepat (Alatas et al., 2016). Skema proses degradasi akibat proses pengeringan dan pembasahan disajikan Gambar 2.2. Pengeringan menyebabkan munculnya retak-retak rambut yang merupakan awal dari proses degradasi. Selanjutnya pada proses pembasahan, air akan diserap *clay shale*, dan retakan awal yang terbentuk saat pengeringan akan mempercepat penyerapan air, dimana *clay shale* yang mengandung banyak *smectite* akan lebih mudah menyerap air (Zhang et al., 2017). Keberadaan air ini akan menyebabkan menurunnya ikatan antar mineral lempung sehingga menyebabkan kuat dukung turun dan terjadi disintegrasi (Stark and Duncan, 1991; Sadisun et al., 2010).

Selain faktor siklus kering basah, jenis beban, dan jenis mineral lempung merupakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap degradasi pada *clay shale*. Pelepasan tegangan juga berdampak meningkatkan risiko terjadinya degradasi pada *clay shale* (Alatas et al., 2016). Pekerjaan galian pada formasi *clay shale* menyebabkan berkurangnya tekanan *overburden*, sehingga terjadi pelepasan tegangan. Pelepasan tegangan ini akan berdampak *clay shale* pada kondisi overkonsolidasi dan mengalami pengembangan, sehingga mempercepat terjadinya degradasi. Selain itu jenis beban pada saat operasi juga berpengaruh terhadap degradasi, dimana beban siklik berpengaruh meningkatkan risiko terjadinya degradasi (Stark and Duncan, 1991). Jumlah dan jenis mineral lempung pada *clay shale* merupakan faktor internal yang mempengaruhi

durabilitas *clay shale*. Secara umum semakin besar kandungan lempung pada *mud rock*, durabilitas batuan semakin rendah (Gautam and Shakoor, 2013; Alatas et al., 2016). Dibandingkan dengan *kaolinite* dan *illite*, *smectite* merupakan mineral lempung yang mempunyai pengaruh paling besar terhadap durabilitas *clay shale*, dimana semakin besar jumlahnya durabilitasnya semakin rendah (Sadisun et al., 2010; Alatas and Simatupang, 2017).



Gambar 2.2 Ilustrasi proses disintegrasi pada pelapukan *clay shale* (Sadisun et al., 2010).

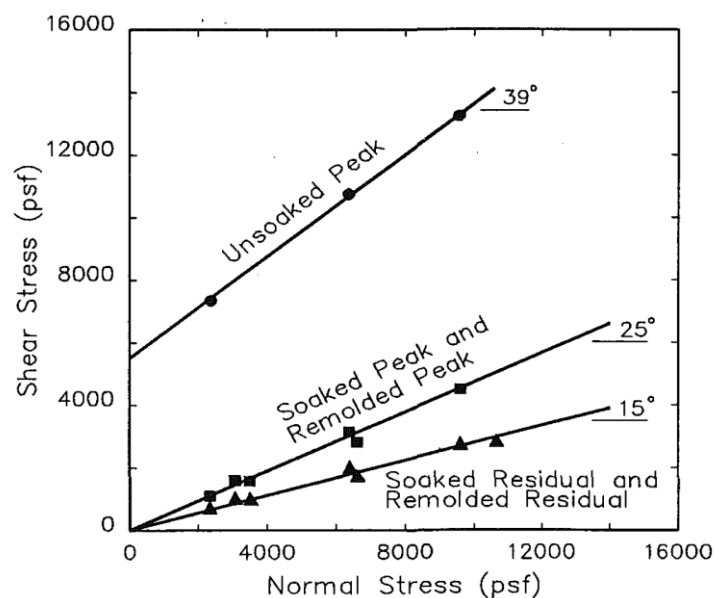
Berdasarkan kajian literatur tersebut di atas, siklus kering basah, mineralogi, dan kondisi beban merupakan aspek-aspek yang mempengaruhi durabilitasnya. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap pelapukan *clay shale* adalah:

- a) *Clay shale* pada kondisi terbuka sehingga terpapar oleh perubahan cuaca (siklus kering-basah).
- b) Pengeringan atau pembasahan secara sendiri-sendiri, namun siklus kering-basah akan menyebabkan degradasi berlangsung lebih cepat.
- c) Pelepasan tegangan sehingga *clay shale* menjadi overkonsolidasi.
- d) Jenis beban, dimana beban siklik akan memberikan efek degradasi lebih cepat dari pada beban statis.
- e) Jenis dan jumlah mineral lempung penyusun *clay shale*, dimana *clay shale* yang mengandung banyak *smectite* akan lebih cepat mengalami degradasi.

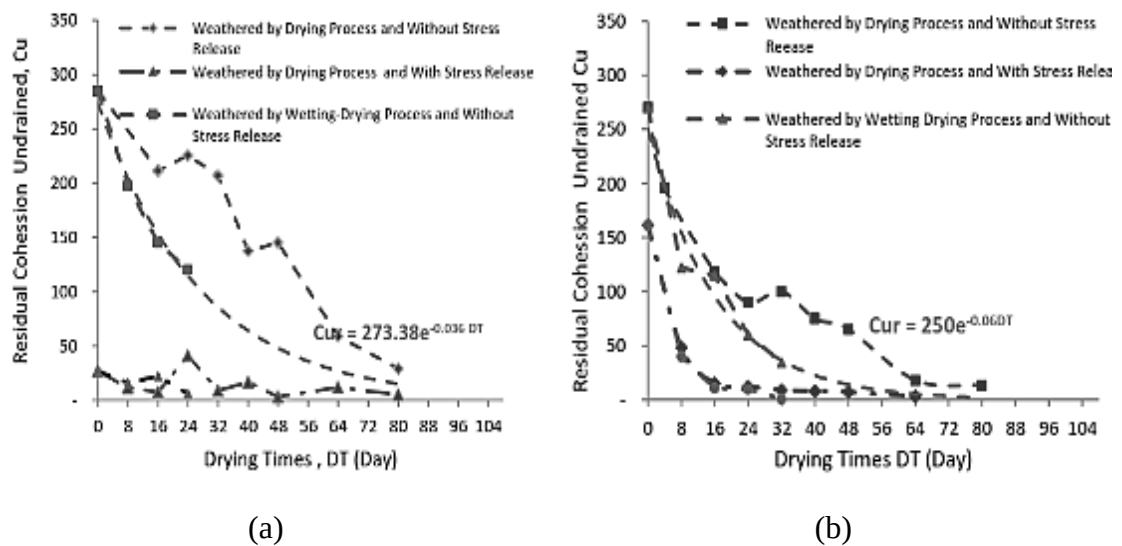
2.1.1.1. Kuat Dukung

Sebagai salah satu jenis batuan sedimen, *clay shale* mempunyai kuat dukung yang relatif tinggi dibandingkan tanah pada umumnya. Beberapa penelitian mendapatkan kuat

dukung pada kondisi belum terdegradasi pada rentang yang hampir sama, yaitu antara 2-20 MPa (Kanji and Leao, 2020), antara 5-15 MPa (Amann et al., 2011), dan pada rentang 1-15 MPa (Berisavljević et al., 2018). Namun demikian kuat dukung *clay shale* tersebut akan mengalami penurunan secara bertahap akibat proses pelapukan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan terjadinya penurunan kuat geser pada *clay shale* yang terdegradasi. Nilai kuat geser *clay shale* setelah mengalami degradasi setara dengan kuat geser pada benda uji yang dibentuk kembali (Stark and Duncan, 1991), seperti disajikan pada Gambar 2.4. Penelitian dengan melakukan perendaman di laboratorium selama 10 hari berdampak menurunnya sudut gesek internal sebesar 61,3% dan kohesi 63,3% (Zhang et al., 2016). Pengujian pelapukan *clay shale* di laboratorium secara alami selama 80 hari dengan pengeringan setiap 8 hari (Gambar 2.4) berdampak menurunkan kuat geser sampai 89% (Alatas et al., 2016). Penurunan kuat geser ini dapat lebih besar pada nilai kohesinya (Yoshida and Hosokawa, 2004), atau pada sudut gesek internalnya (Zhang et al., 2016). Meskipun terdapat perbedaan, kedua parameter kuat geser tersebut mengalami penurunan yang besar.



Gambar 2.3 Perubahan nilai kuat geser lempung pada berbagai kondisi (Stark and Duncan, 1991).



Gambar 2.4 Pengaruh pelapukan oleh siklus kering-basah terhadap penurunan nilai kohesi *clay shale*, sampel dari: (a) Bawen, dan (b) Hambalang (Alatas et al., 2016).

2.1.1.2. Durabilitas

Tingkatan degradasi (*grade*) dikelompokkan dalam enam tingkatan yaitu *grade* I sampai VI (Dearman, 1974). *Grade* I merupakan kondisi batuan segar yang belum mengalami pelapukan atau hanya sedikit pada bagian permukaan. Sedangkan *grade* ke VI merupakan tingkatan pelapukan tertinggi dimana seluruh batuan sudah menjadi tanah. Pengelompokan batuan berdasarkan tingkat pelapukan disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi batuan berdasarkan tingkat pelapukannya (Dearman, 1974)

<i>Grade</i>	Kategori <i>Grade</i>		Deskripsi
I	A	<i>Fresh</i>	Tidak ada tanda-tanda pelapukan
	B	<i>Faintly weathered</i>	Pelapukan hanya terjadi di permukaan
II		<i>Slightly weathered</i>	Telah terjadi pelapukan di permukaan dan sedikit pada massa batuan.
III		<i>Moderately weathered</i>	Pelapukan telah terjadi pada seluruh massa batuan, tetapi belum mudah lepas
IV		<i>Highly weathered</i>	Pelapukan telah terjadi pada seluruh massa batuan dan fragmen mudah lepas
V		<i>Completely weathered</i>	Seluruh batuan telah terurai dan dalam kondisi rapuh, tetapi struktur batu dan tekstur dipertahankan.
VI		<i>Residual soil</i>	Material tanah dengan tekstur, struktur, dan mineral terdegradasi penuh.

Secara alamiah setiap batuan mengalami proses pelapukan dengan kecepatan yang berbeda-beda tergantung tingkat ketahanannya (durabilitas). Untuk mengukur

tingkat durabilitas tersebut telah dikembangkan beberapa metode pengujian. Metode *slake durability test* SDT merupakan metode pengujian durabilitas batuan (Verhoef, 1989) dan merupakan standar pengujian durabilitas pada standar ASTM D4644-04 (ASTM, 1998). Prinsip pengujian dilakukan dengan siklus pengeringan dan perendaman dalam drum dan diputar dalam air. Nilai durabilitas diukur pada siklus ke dua (I_{d2}), yang merupakan perbandingan berat yang tertahan ayakan no. 10 dengan berat semula. Kelebihan metode SDT adalah prosesnya yang relatif cepat, namun prosesnya berbeda kenyataan di lapangan dan hasilnya dipengaruhi oleh faktor bentuk benda uji (Agustawijaya, 2003; Ankara et al., 2016). Pengembangan metode SDT telah dilakukan dengan mengembangkan parameter *disintegration ratio* (D_R) yang merupakan luas area grafik gradasi pada pengujian SDT (Erguler and Shakoor, 2009). Berdasarkan pengujian SDT, klasifikasi durabilitas batuan dapat dilakukan berdasarkan nilai I_{d2} maupun D_R seperti disajikan pada Tabel 2.2.

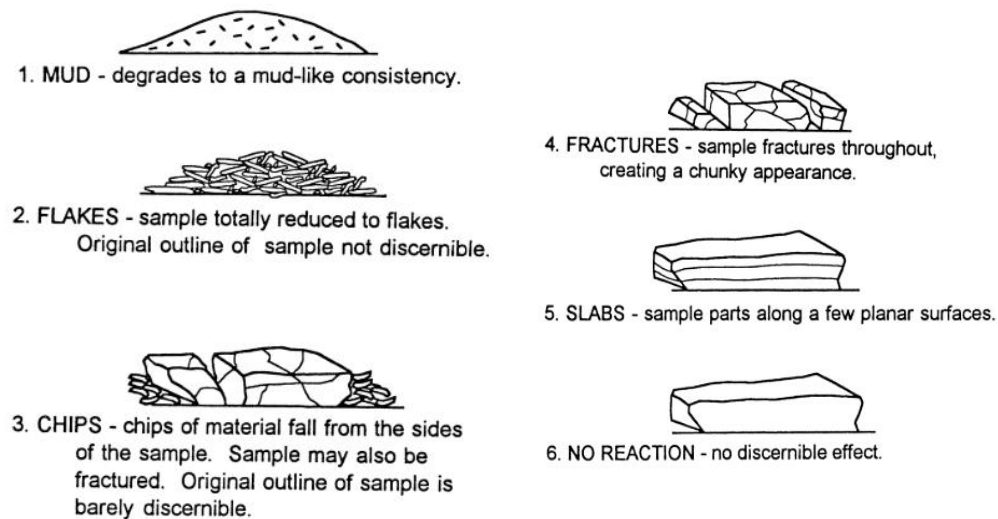
Tabel 2.2 Klasifikasi durabilitas batuan berdasarkan nilai *disintegration ratio* (Erguler and Shakoor, 2009).

Klasifikasi	<i>Durability Index</i> (I_{d2}) (persen)	<i>Disintegration Ratio</i> (D_R)
Sangat rendah	0-30	0,00-0,19
Rendah	30-60	0,20-0,49
Sedang	60-85	0,50-0,78
Sedang-tinggi	85-95	0,79-0,91
Tinggi	95-98	0,92-0,95
Sangat tinggi	98-100	0,96-1,00

Pengujian SDT kurang menggambarkan proses di lapangan. Penelitian degradasi yang lebih alamiah dilakukan dengan siklus pengeringan dan pembasahan pada udara terbuka, dengan siklus di ulang untuk setiap 8 hari selama satu tahun (Gautam and Shakoor, 2013). Nilai D_R , dari hasil pengujian alamiah ini memberikan hasil yang lebih representatif dari pada pengujian SDT (Gautam and Shakoor, 2015). Namun demikian pengujian alamiah ini memerlukan waktu yang cukup lama, sehingga dikembangkan hubungan antara D_R dan I_{d2} (Gautam and Shakoor, 2017), seperti disajikan pada Persamaan 2.1.

$$D_R = 0,0019 \cdot (I_{d2})^{1,3544} \quad (2.1)$$

Metode *jar slake test* (JST) merupakan pengembangan dari metode deskriptif (Dearman, 1974), dengan mengembangkan deskripsi secara visual (Gambar 2.5). Pengamatan dilakukan setelah benda uji dilakukan pengeringan di dalam oven selama 16 jam dan selanjutnya direndam di dalam air. Pengamatan dilakukan setelah perendaman selama 30 menit dan 24 jam (Santi, 1998). Penentuan tingkat durabilitas diamati secara visual dengan mengacu Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Deskripsi secara visual hasil jar slake test (Santi, 1998).

Nilai JST dikelompokkan dalam 6 tingkatan tingkatan dan memiliki hubungan dengan hasil uji SDT, seperti disajikan pada Tabel 2.3 (Santi, 2006). Secara formulasi, nilai SDT (I_{d2}) dapat diperkirakan berdasarkan nilai JST, dengan Persamaan 2.2.

$$I_{d2} = 32 \cdot \text{JST} - 1,7 \quad (2.2)$$

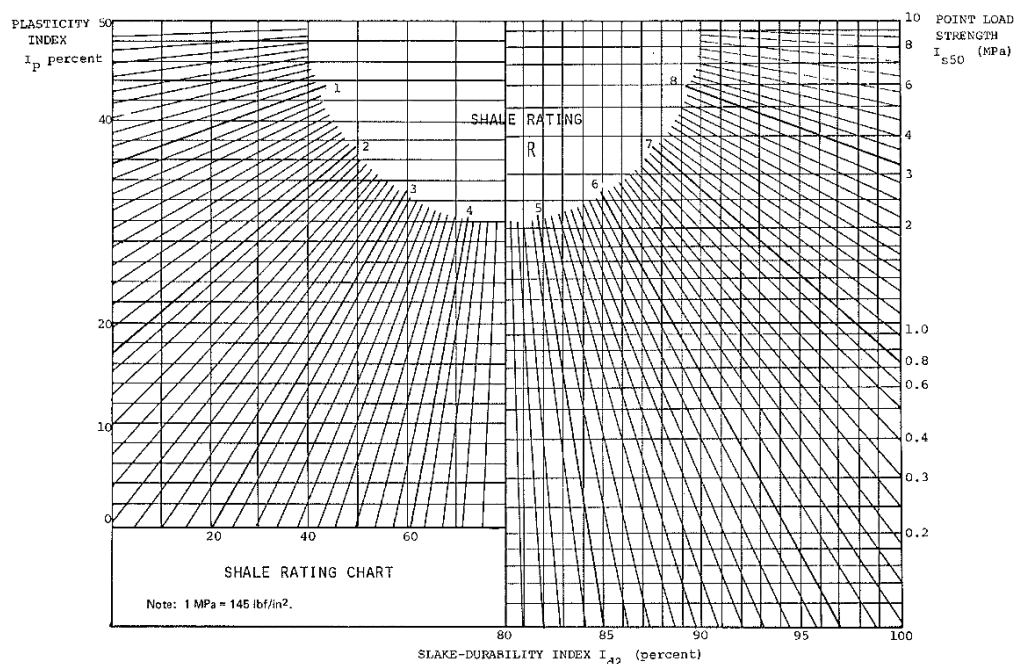
Tabel 2.3 Hubungan antara nilai JST dan SDT (Santi, 2006)

Nilai JST (R)	Deskripsi visual batuan setelah uji jar	Nilai SDT
1	Mud	0-15
2	Flake	15-25
3	Chips	25-40
4	Fractures	40-55
5	Slabs	55-70
6	Tidak ada reaksi	70-100

Metode pengujian SDT dan JST memiliki kelebihan dari sisi kecepatan dari pada metode alamiah. Metode JST lebih cocok digunakan untuk batuan *grade* IV dan V,

sedangkan SDT lebih cocok untuk *grade* II dan III (Mohamad et al., 2011). Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa perendaman selama 15 sudah dapat digunakan untuk interpretasi tingkat pelapukan batuan, yaitu jika sampel hancur maka masuk *grade* V, jika sampel retak-retak maka masuk *grade* IV, dan jika tidak mengalami perubahan maka masuk *grade* I – III, dan harus diuji dengan SDT atau metode lain.

Shale rating merupakan metode klasifikasi *clay shale* yang menggabungkan nilai SDT, indeks plastisitas, dan *point load test* (Franklin, 1981). Untuk SDT kurang dari 80%, nilai shale rating ditentukan berdasarkan nilai SDT dan indeks plastisitas, sedangkan untuk SDT lebih dari 80% menggunakan nilai SDT dan poin load test, dengan menggunakan Gambar 2.6.



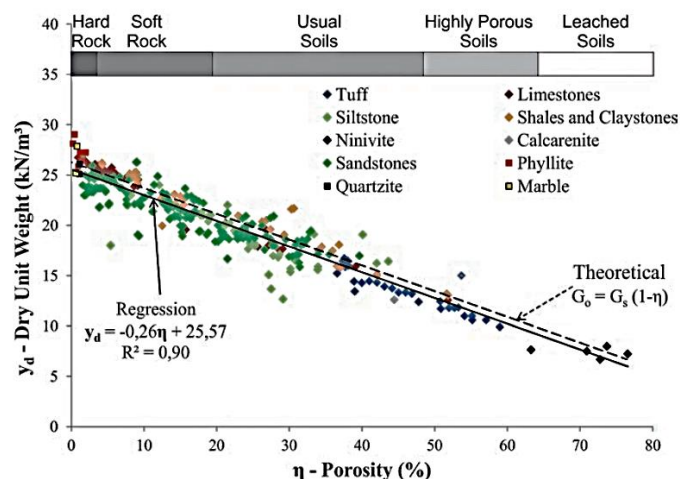
Gambar 2.6 Shale rating berdasarkan nilai SDT, indeks plastisitas, dan point load test (Franklin, 1981).

Selain metode SDT, metode alamiah, dan JST, beberapa metode yang pernah dikembangkan antara lain metode *simple slaking* (Yoshida and Hosokawa, 2004), metode *loss slake index* yang didasarkan pada pengujian SDI (Bryson et al., 2012) dan metode *weathered potential index* yaitu metode interpretasi berdasarkan parameter kepadatan dan porositas (Singh et al., 1987) dan pengembangan parameter G, yaitu metode interpretasi yang didasarkan pada *collective parameter structural strength* (Nickmann et al., 2006).

2.1.1.3. Porositas

Porositas (n) merupakan perbandingan antara volume pori (V_v) dan volume total (V_t) tanah atau batuan (Knappett and Craig, 2012). Nilai porositas dapat dihitung berdasarkan hasil pengujian sifat-sifat fisiknya, yaitu kadar air (w), berat satuan (γ), dan *specific gravity* (G). Selain itu porositas dapat ditentukan dengan pengujian di laboratorium, yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis yaitu menggunakan fluida dan metode radiasi (Anovitz and Cole, 2015).

Pada kondisi tidak terdegradasi porositas *clay shale* rendah yaitu kurang dari 20% (Amann et al., 2011; Kanji and Leao, 2020). Namun pada saat terdegradasi penuh porositasnya meningkat sampai 54% (Singh et al., 1987). Peningkatan porositas ini terjadi akibat munculnya retakan-retakan antar fragmen, dimana pada kondisi terdegradasi penuh, *clay shale* sudah dalam bentuk fragmen-fragmen (Santi, 1998). Pada kondisi terdegradasi ini pori *clay shale* terdiri atas dua jenis, yaitu *intra-agregat* dan *inter-agregat* (Li and Zhang, 2009). Pori *intra-agregat* merupakan pori di dalam butiran atau fragmen, sedangkan *inter-agregat* merupakan pori diantara butiran antara fragmen yang terbentuk akibat degradasi. Berdasarkan tinjauan porositas (Gambar 2.7), sebelum terdegradasi *clay shale* termasuk batuan lunak, namun pada kondisi terdegradasi dapat dikelompokkan dalam kategori tanah.



Gambar 2.7 Hubungan antara porositas dan berat satuan kering batuan dan tanah (Kanji and Leao, 2020).

2.1.2. Semen

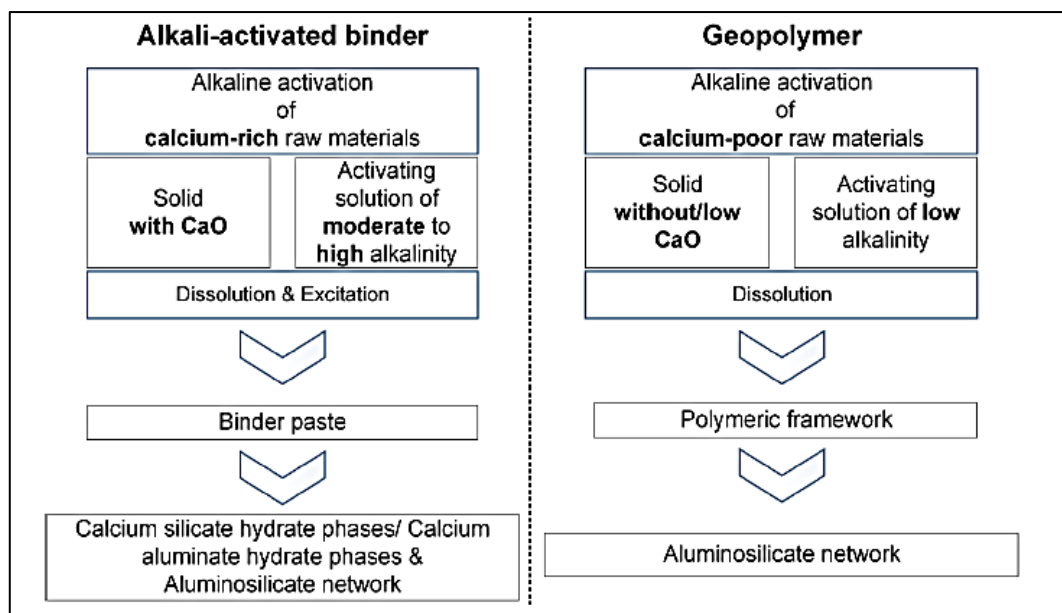
Semen merupakan salah satu bahan ikat berbasis kalsium (Behnood, 2018). Komponen utama dalam semen adalah *tri calcium silicate* ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) atau sering disingkat C_3S , *di calcium silicate* ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) disingkat C_2S , *tri calcium aluminate* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) disingkat C_3A dan *tetra calcium aluminoferrate* ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) disingkat C_4AF (Neville, 2011). Berdasarkan komponen-komponen tersebut tampak bahwa semen merupakan bahan ikat yang berbasiskan kalsium. Semen portland atau *ordinary portland cement* (OPC) merupakan jenis semen yang umum dipakai secara luas. OPC terdiri atas lima jenis, yaitu jenis I sampai dengan jenis V (BSN, 2004a), dengan semen jenis I merupakan semen yang secara umum banyak dipakai dan tidak memerlukan persyaratan khusus. Sebagai upaya mengurangi emisi CO_2 , saat ini produksi OPC sudah dibatasi dan digantikan dengan semen Portland komposit (PCC) dan semen posolan komposit (PPC). Dari sembilan pabrik semen di Indonesia delapan diantaranya memproduksi PCC, sedangkan yang memproduksi PPC sebanyak 2 pabrik (Irawan, 2013). PCC merupakan OPC yang dicampur dengan bahan anorganik dengan kadar 6-35%. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), posolan, senyawa silikat, dan batu kapur (BSN, 2004b). PPC merupakan OPC yang dicampur dengan bubuk posolan dengan kadar 6 % - 40 % (BSN, 2004c).

2.1.3. Geopolymer

Geopolymer merupakan material anorganik berbasis alumina-silika atau *poly-sialate* yang disusun oleh unsur silikon (Si) dan aluminium (Al) yang dapat membentuk ikatan seperti batu alam. Pada awalnya *geopolymer* dikembangkan sebagai bahan substitusi semen pada beton (Davidovits, 1994; Ekaputri and Triwulan, 2013). *Geopolymer* dibuat dengan mencampurkan *binder* dengan aktivator yang bersifat alkali. Bahan *binder* yang digunakan antara lain *fly ash* (FA), *granulated blast furnace slag* (GBGS), *mud*, *metakaolin*, abu sekam padi (Ekaputri and Triwulan, 2013; Singhi et al., 2016; Thapa and Waldmann, 2018). Sedangkan aktivator alkali yang sering digunakan adalah NaOH atau KOH yang dicampur dengan Na_2SiO_3 atau K_2SiO_3 (Thapa and Waldmann, 2018). Pengembangan *geopolymer* sebagai material alternatif ini merupakan salah satu upaya pengembangan material yang ramah lingkungan untuk substitusi semen, dimana produksi

semen menyumbang 5%-7% CO₂ di dunia dan memerlukan energi sebesar 3% dari total konsumsi energi dunia (Carrasco and Puertas, 2017).

Pembuatan *geopolymer* memerlukan aktivator alkali, sehingga *geopolymer* juga dapat dikelompokkan dalam jenis *alkaline activated material* (AAM). *Geopolymer* merupakan AAM dengan bahan *binder* rendah kalsium, sehingga akan membentuk ikatan N-A-S-H (Thapa and Waldmann, 2018), sedangkan AAM dengan kalsium tinggi akan membentuk ikatan C-A-S-H. Mekanisme pembentukan AAM dan *geopolymer* disajikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mekanisme pada alkali activated material dan geopolymer (Thapa and Waldmann, 2018).

2.1.3.1. *Fly ash*

Fly ash (FA) atau abu terbang merupakan abu halus dari pembakaran batu bara yang terbawa aliran udara panas. FA ini banyak dihasilkan pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan bahan bakar batu bara. FA dikelompokkan dalam 2 (dua) tipe yaitu tipe C dan F (BSN, 2014). FA tipe C mempunyai kadar CaO (*Calcium Oxide*) lebih dari 10%, sedangkan tipe F mempunyai kadar CaO kurang dari 10%. Syarat untuk dapat digunakan dalam campuran pembuatan beton FA harus mempunyai kandungan ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) minimal 50% untuk tipe C dan 70% untuk tipe F. Kadar CaO dalam FA menentukan dalam kecepatan reaksi (waktu ikat), dimana tipe C akan lebih cepat dibandingkan dengan tipe F. Secara umum semakin tinggi kandungan kalsium

(CaO) waktu ikat *geopolymer* akan semakin cepat (Wijaya et al., 2017). Untuk wilayah Jawa Tengah, salah satu yang banyak diteliti untuk pembuatan *geopolymer* berasal dari PLTU Tanjungjati Jepara (Jumaeri et al., 2009; Astuti et al., 2012; Ekaputri and Triwulan, 2013; Qomaruddin et al., 2019), dimana *fly ash* tersebut termasuk tipe F dengan kandungan silika yang tinggi.

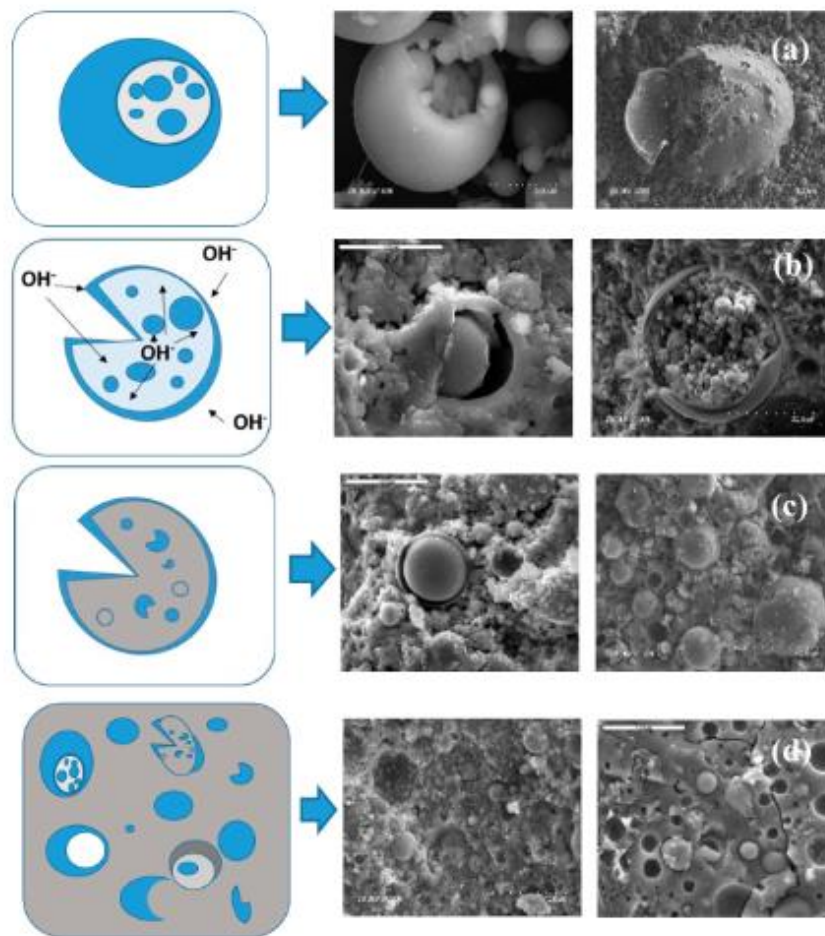
Jumlah kandungan mineral pada fase *amorph* merupakan faktor menentukan keberhasilan dalam proses *geopolymerization* (Li et al., 2019), hal ini dikarenakan material *amorph* memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan fase kristal. Analisis kadar *amorph* ini dapat dilakukan berdasarkan data uji XRD dengan menggunakan metode *subtracting* (Ahvenainen et al., 2016). Indikasi terjadinya reaksi *geopolymerization* dapat diamati dengan berkurangnya fase *amorph* (Chen-Tan et al., 2009). Namun demikian potensi berkurangnya kadar *amorph* yang berarti bertambahnya kadar kristal ini hanya terjadi pada rasio mol Si/Al rendah yaitu pada rentang 1,15-1,25, sedangkan pada rasio lebih besar dari 1,5 potensinya kecil (Tsitouras et al., 2010; Kim and Lee, 2020). Selain itu indikasi terjadinya reaksi *geopolymerization* dapat diamati dengan posisi puncak *amorph* yang bergeser (Ahvenainen et al., 2016).

2.1.3.2. Aktivator

Konseptual proses *geopolymerization* dimulai dengan proses *dissolution*, proses penyebaran dan proses pembentukan gel (Garcia-Lodeiro et al., 2016), seperti disajikan pada Gambar 2.9. Pada tahap awal aktivator berfungsi dalam proses *dissolution* dimana NaOH atau KOH akan melarutkan *fly ash*. Proses *dissolution* pada *fly ash* yang halus (kurang dari 1 μ m) berlangsung dengan cepat. Pada *fly ash* dengan butiran yang besar proses *dissolution* akan berlangsung lebih lama karena *fly ash* terlindungi oleh cangkang atau *cenosphere* (Palomo et al., 1999; Garcia-Lodeiro et al., 2016), dan proses ini dapat berlangsung lebih dari 72 jam (Yin et al., 2018). Setelah proses *dissolution*, selanjutnya proses penyebaran untuk menyiapkan pembentukan gel. Pada proses pembentukan gel ini, *sodium silicate* dalam aktivator berfungsi mempercepat reaksi *geopolymerization*.

Kebutuhan aktivator optimum pada pembuatan *geopolymer* berbeda-beda sesuai dengan peruntukannya. Aktivator pada *geopolymer* diperlukan untuk melarutkan material *binder*. Kebutuhan aktivator pada pasta *geopolymer* dengan *binder fly ash* adalah sebesar 0.35-0,40 (Bakri et al., 2012; Leong et al., 2016). Pada pembuatan mortar *geopolymer*,

rasio aktivator *binder* optimum didapatkan pada rentang 0,5–0,6 (Hadi et al., 2018), sedangkan pada beton nilai optimumnya sebesar 0.65 (Adam et al., 2019). Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kadar aktivator optimum dipengaruhi oleh jenis material yang disementasi (diikat). Pada pembuatan beton, rentang optimum dicapai pada NaOH dengan konsentrasi 8-16 M (Mulyana et al., 2017; Qomaruddin, 2018), perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=5,5$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=1$ dan $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=7$ (Yunsheng et al., 2010). Dalam pembuatan *geopolymer*, aktivator akan mempunyai 2 (dua) peran yaitu sebagai aktivator dan penentu kelecakan *geopolymer*. Seperti pada pembuatan pasta semen, semakin banyak aktivator, *geopolymer* yang dihasilkan akan semakin lecah. Namun demikian karena proporsi *binder* menjadi berkurang, potensi menurunnya kemampuan ikatan akan terjadi.

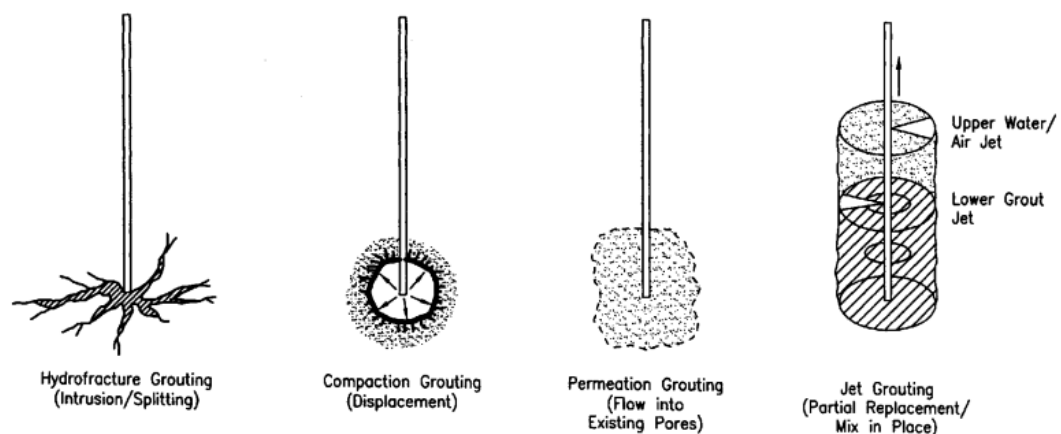


Gambar 2.9 Model konseptual proses *geopolymerization*: (a) material awal, (b) proses *dissolution* oleh larutan basa (NaOH), (c) penyebaran *geopolymer* di dalam dan diluar *fly ash geopolymerization*, dan (d) hasil *geopolymerization* (Garcia-Lodeiro et al., 2016).

2.1.4. Metode Injeksi Grouting

Stabilisasi dengan metode *mixing*, memiliki kendala untuk diterapkan pada lapisan bawah permukaan maupun perbaikan pada area yang telah ada konstruksinya. Injeksi *grouting* merupakan metode perbaikan tanah dengan memasukkan bahan stabilisasi (*grouting*) ke dalam pori-pori, retakan atau rongga tanah (Cambefort, 1977; Raju and Valluri, 2008). Metode injeksi *grouting* merupakan alternatif untuk mengatasi kendala pada metode *mixing* tersebut. Pada umumnya stabilisasi dengan metode injeksi ini menggunakan bahan berbentuk cairan atau suspensi.

Metode *grouting* pada tanah telah berkembang dengan berbagai variasi yang dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis, yaitu *permeation grouting*, *fracture grouting*, *compaction grouting*, dan *jet grouting* (Rawlings et al., 2000; Warner, 2004) dengan skema disajikan pada Gambar 2.10. *Permeation grouting*, atau sering disebut dengan *pressure grouting* adalah metode injeksi *grouting* dengan memberikan tekanan untuk maksud mengisi pori-pori tanah dengan *grouting*. *Fracture grouting* merupakan metode *grouting* pada tanah lunak dengan tekanan tinggi sehingga timbul retakan horizontal dan terisi *grouting*. *Fracture grouting* ini dimaksudkan untuk mengembalikan muka tanah yang telah mengalami deformasi. *Jet grouting* merupakan metode injeksi dengan tekanan tinggi sehingga mengikis tanah di sekitar lubang bor dan bercampur dengan bahan *grouting*. Metode *compaction grouting* dimaksudkan untuk meningkatkan kepadatan tanah. Bahan *grouting* digunakan relatif padat dan injeksi dilakukan dengan tekanan yang tinggi sehingga memadatkan tanah di sekitarnya.



Gambar 2.10 Skema injeksi *grouting* (Rawlings et al., 2000).

Injeksi *grouting* dengan tujuan mengisi pori-pori tanah dengan bahan *grouting* merupakan jenis *permeation grouting*. Perbaikan tanah dengan injeksi *grouting* ini dapat dikategorikan metode *non-destructive* (Ni and Cheng, 2012; Guo et al., 2020) sehingga dapat diimplementasikan untuk perbaikan tanah di bawah perkerasan jalan atau yang lainnya (Gambar 2.11). Metode ini menggunakan tekanan yang tidak terlalu besar agar tidak terjadi perubahan struktur tanah. Besarnya tekanan yang diberikan tidak boleh lebih dari 20 kPa per meter kedalaman (Raju and Valluri, 2008), dan sebaiknya diberikan koreksi sebesar 0,75 (Park and Oh, 2018).

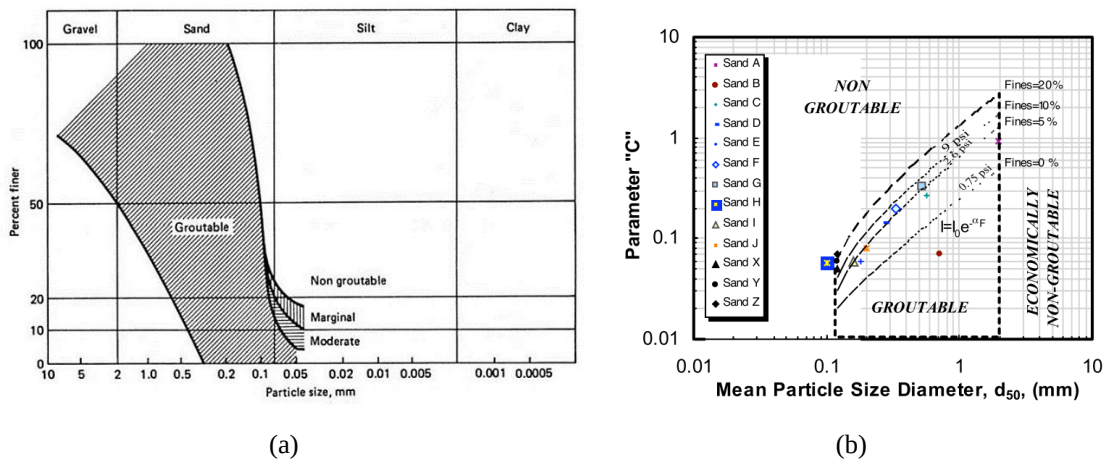
Secara umum semakin besar ukuran butiran tanah, injeksi *grouting* semakin mudah diaplikasikan. Berdasarkan grafik distribusi ukuran butiran tanah pasir dan kerikil merupakan zona yang memungkinkan dilakukan *grouting (groutable zone)* seperti pada Gambar 2.12 (Karol, 2003). Pendekatan sederhana dapat menggunakan nilai d_{50} , dimana rentang *groutable* antara 0,1-2 mm (Vipulanandan and Ozgurel, 2009), seperti pada Gambar 2.12. Kriteria *groutability* dapat juga ditentukan berdasarkan nilai permeabilitasnya (k) yang dikelompokkan dalam 5 kelompok (Karol, 2003), yaitu:

- a) permeabilitas $< 10^{-6}$ cm/detik, merupakan zona *ungroutable*,
- b) permeabilitas $10^{-5} - 10^{-6}$ cm/detik, dapat dilakukan *grouting* namun sulit dan terbatas untuk bahan *grouting* dengan viskositas rendah (< 5 cP),
- c) permeabilitas $10^{-3} - 10^{-5}$ cm/detik, mudah untuk bahan *grouting* dengan viskositas rendah dan sulit untuk viskositas tinggi (> 10 cP),
- d) permeabilitas $10^{-1} - 10^{-3}$ cm/detik, dapat untuk *chemical grout*.
- e) permeabilitas $> 10^{-1}$ cm/detik, dapat untuk *grouting* berbentuk *suspended solid*.

Pola penyebaran *grouting* pada metode injeksi yang mungkin terjadi adalah pola *permeation*, *compaction* dan *fracture*. Pembentukan pola ini sangat dipengaruhi oleh distribusi ukuran butirnya. Penelitian pada tanah dari pelapukan granit (Zhang et al., 2020) menunjukkan bahwa pola *permeation* terjadi pada $D_{10} > 0,092$ mm, sedangkan untuk $D_{10} < 0,092$ mm akan membentuk pola *compaction* atau *fracture*. Untuk $D_{10} < 0,092$ mm, dengan $D_{60} > 0,37$ mm akan membentuk pola *compaction*, $D_{60} < 0,31$ mm membentuk pola *fracture*, sedangkan $0,37 \text{ mm} > D_{60} > 0,31 \text{ mm}$ membentuk pola gabungan *compaction* dan *fracture*.



Gambar 2.11 Injeksi *grouting* pada tanah dasar di bawah perkerasan kaku Bandara Magong Penghu (Ni and Cheng, 2012).



Gambar 2.12 Groutable zone berdasarkan distribusi ukuran butiran: (a) groutable zone berdasarkan grafik distribusi butiran tanah (Karol, 2003), dan (b) groutable zone berdasarkan d_{50} (Vipulanandan and Ozgurel, 2009).

Injeksi *grouting* cocok untuk tanah granular, dimana bahan *grouting* akan mudah mengalir dan mengisi pori-pori antar butiran tanah. Bahan *grouting* berfungsi mengikat butiran tanah sehingga meningkatkan kuat dukungnya. Beberapa penelitian injeksi *grouting* berhasil meningkatkan kuat dukung baik pada tanah berpasir (Kaga and Yonekura, 1992; Dano et al., 2004; Kumar et al., 2015) maupun tanah pasir berkerikil (Ping et al., 2008; Sumirin and Arief, 2017).

Bahan stabilisasi yang digunakan dalam metode injeksi harus memiliki dua kriteria, yaitu dapat mengalir masuk dalam pori-pori tanah dan mampu mengikat butiran tanah. Semen merupakan bahan yang memiliki ikatan yang kuat sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan stabilisasi. Pada beton, rasio air semen (f_{pc}) berpengaruh

terhadap kelecakan dan kuat dukung yang dihasilkan. Hasil penelitian injeksi pasta semen campur lempung menunjukkan rentang f_{PC} untuk injeksi adalah sekitar 0,75 sampai dengan 1,5 (Zhang et al., 2018), nilai f_{PC} ini menunjukkan bahwa injeksi semen memerlukan kelecakan yang lebih tinggi dibandingkan pada pembuatan beton. Penyebaran bahan stabilisasi pada pori-pori tanah memerlukan waktu sehingga diperlukan bahan stabilisasi yang tidak cepat mengeras, sehingga penggunaan bahan yang cepat mengeras seperti *silica sol* tidak cocok digunakan (Pan et al., 2016).

Pada proses injeksi, bahan *grouting* mengalir, menyebar dan mengisi pori-pori tanah dari lubang injeksi. Aliran *grouting* ini didorong oleh tekanan injeksi selama durasi injeksi. Formula klasik sebaran injeksi yang dikembangkan berdasarkan prinsip aliran pada media porus (Hou et al., 2019), disajikan pada Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4. Pada persamaan tersebut, radius injeksi dipengaruhi oleh porositas, permeabilitas, durasi, tekanan, viskositas bahan stabilisasi. Variabel yang berpengaruh pada persamaan tersebut sesuai dengan hasil penelitian pada tanah kerikil berpasir (Ping et al., 2008), yaitu porositas, permeabilitas, tekanan, durasi, dan faktor air semen. Berdasarkan variabel-variabel yang berpengaruh tersebut dapat dikelompokkan dalam tiga aspek, yaitu aspek tanah, aspek bahan *grouting* dan aspek injeksi.

$$R_i = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot t \cdot p}{n \cdot \beta \cdot \ln\left(\frac{R_i}{R_b}\right)}} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_w} \quad (2.4)$$

Keterangan:

- R_i = jari-jari sebaran injeksi (cm)
- R_b = jari-jari lubang bor (cm)
- k = permeabilitas (cm/s)
- t = durasi injeksi (s)
- p = tinggi tekanan injeksi (cm)
- n = porositas
- μ_s = viskositas bahan stabilisasi (mPa.s)
- μ_w = viskositas air (mPa.s).

Formula empiris sebaran injeksi *grouting* pasta semen pada tanah pasir berdasarkan pengujian laboratorium membentuk persamaan berpangkat terhadap variabel-variabel permeabilitas, rasio air semen, tekanan, dan volume injeksi *grouting* (Yang et al., 2019), seperti disajikan pada Persamaan 2.5.

$$R_{cg} = 1,9065k^{0,461}f_{PC}^{0,2333}p^{0,1688}V_i^{0,2491} \quad (2.5)$$

Keterangan:

R_{cg} = jari-jari kolom *grouting* (cm)

k = permeabilitas (cm/s)

f_{PC} = rasio air semen

p = tekanan injeksi (MPa)

V_i = Volume injeksi (ml)

2.1.4.1. Aspek Tanah

Berdasarkan persamaan Persamaan 2.3 (Hou et al., 2019), porositas dan permeabilitas merupakan variabel tanah yang berpengaruh terhadap proses injeksi. Persamaan tersebut dikembangkan dengan asumsi kondisi pori jenuh, sehingga tidak melibatkan kadar air. Namun hasil eksperimen menunjukkan bahwa keberadaan air pori berpengaruh dalam proses injeksi, dimana semakin tinggi derajat kejenuhan tanah injeksi semakin sulit dilakukan, hal ini karena *grouting* lebih mudah mendorong udara dari pada air pori (Perret et al., 2000). Berdasarkan hal tersebut, selain porositas, kadar air merupakan variabel yang berpengaruh terhadap proses injeksi.

Angka pori dan permeabilitas merupakan dua variabel yang saling berkaitan, dimana semakin besar angka pori permeabilitas semakin besar. Hubungan antara permeabilitas dengan angka pori (e) disajikan pada Persamaan 2.6 (Hardiyatmo, 1992).

$$k \approx \frac{e^3}{1 + e} \quad (2.6)$$

Nilai angka pori dapat disajikan dalam persamaan fungsi porositas (n), seperti disajikan pada Persamaan 2.7. Selanjutnya substitusi Persamaan 2.7 kedalam Persamaan 2.6 akan menghasilkan hubungan antara permeabilitas dan porositas, seperti disajikan pada Persamaan 2.8.

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (2.7)$$

$$k \approx \frac{n^3}{(1 - n)^2} \quad (2.8)$$

2.1.4.2. Aspek Bahan Grouting

Pada tahap proses injeksi, viskositas merupakan variabel yang berpengaruh pada proses injeksi. Viskositas bahan *grouting* ini dipengaruhi oleh jenis bahan dan komposisi campurannya. Viskositas *grouting* berpengaruh terhadap proses injeksi, dimana semakin tinggi viskositasnya *grouting* semakin kental sehingga lebih sulit diinjeksikan (Markou and Atmatzidis, 2002; Aboulayt et al., 2018; Hou et al., 2019).

Pengujian viskositas cairan dilakukan dengan prinsip mengalirkan cairan melalui pipa kapiler. Persamaan umum aliran fluida cairan pada pipa kapiler tersebut disajikan pada Persamaan 2.9 (Mohammed et al., 2013).

$$q = \left(\rho g \frac{\pi r^x}{S \mu} \right) \left(\frac{h}{L} \right) \quad (2.9)$$

Keterangan:

- μ = viskositas larutan (mPa.s),
- q = debit aliran (cm³/dt),
- ρ = berat satuan (gram/cm³),
- g = percepatan gravitasi (cm/dt²),
- h = tinggi tekanan (cm), dan
- L = panjang lintasan (cm).

Sedangkan S dan x adalah faktor bentuk, dengan nilai S = 8 dan x = 4 untuk tabung lingkaran. Salah satu metode pengujian viskositas dilakukan dengan metode Oswald dilakukan dengan mengalirkan cairan pada tabung pipa kapiler dan membandingkan dengan fluida standar. Besarnya viskositas cairan yang diuji dihitung dengan Persamaan 2.10.

$$\mu = \mu_w \frac{\rho \cdot t}{\rho_w t_w} \quad (2.10)$$

Keterangan:

- μ = viskositas larutan yang dicari (Pa.s),
- μ_w = viskositas larutan standar (Pa.s), untuk air sebesar 1 mPa.s,
- ρ = density larutan (gram/cm³),
- ρ_w = berat satuan pembanding, untuk air nilainya sebesar 1 gram/cm³,
- t = waktu larutan untuk turun sebesar y (detik), dan
- t_w = waktu air untuk turun sebesar y (detik).

Selain menggunakan aliran pada pipa kapiler, pengujian viskositas dapat dilakukan menggunakan Marsh Funnel (Mohammed et al., 2014; Mohammed et al., 2015), Ford Cup (ASTM, 2005a) dan Zahn Cup (ASTM, 2005b). Nilai viskositas berdasarkan pengujian Ford Cup dan Zahn Cup dihitung menggunakan Persamaan 2.11, dengan parameter K dan C disajikan pada Tabel 2.4.

$$\mu = K(t - C) \quad (2.11)$$

Keterangan:

- μ = viskositas larutan (cST)
- t = waktu (detik)
- K dan C = parameter dari masing-masing cup.

Tabel 2.4 Nilai K dan C untuk pengukuran viskositas dengan Ford Cup (ASTM, 2005a) dan Zahn Cup (ASTM, 2005b)

Ford Cup			Zahn Cup		
No Cup	K	C	No Cup	K	C
1	0,49	35,0	1	1,1	29,0
2	1,44	18,0	2	3,5	14,0
3	2,31	6,58	3	11,7	7,5
4	3,85	4,49	4	14,8	5,0
5	12,1	2,00	5	23,0	0

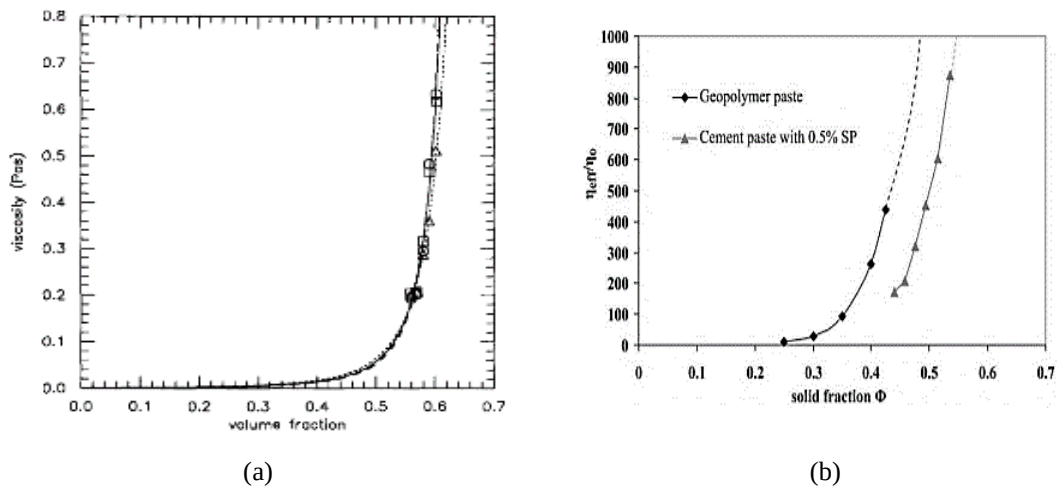
Bahan *grouting* dibuat dengan mendispersikan bahan padat ke dalam cairan pelarut, sehingga viskositasnya dipengaruhi oleh viskositas pelarut dan jumlah bahan padatnya. Persamaan viskositas *grouting* berdasarkan persamaan Krieger-Dougherty (Struble and Sun, 1995) disajikan pada Persamaan 2.12. Pengaruh perbedaan viskositas pelarut ini tampak pada perbandingan viskositas pasta semen dan *geopolymer* pada

proporsi yang setara (Favier et al., 2014), dimana viskositas *geopolymer* lebih tinggi dari pada pasta semen (Gambar 2.13.b). Selain itu, semakin banyak jumlah bahan padat yang dilarutkan, viskositas yang dihasilkan semakin tinggi (Liard et al., 2015; Choi et al., 2016; Kim et al., 2018; Wang et al., 2018; Djaha et al., 2019). Perilaku ini terjadi pada pasta semen maupun *geopolymer*. Perbandingan viskositas dari beberapa penelitian pasta semen dan *geopolymer* disajikan pada Tabel 2.5.

$$\mu = \mu_s \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{max}}\right)^{-[\mu]\phi_{max}} \quad (2.12)$$

Keterangan:

- μ = viskositas larutan (Pa.s)
- μ_s = viskositas pelarut (Pa.s)
- ϕ = fraksi yang dilarutkan dalam volume
- ϕ_{max} = maksimum fraksi yang dilarutkan dalam volume
- $[\mu]$ = viskositas intrinsik



Gambar 2.13 Kurva hubungan fraksi pada dan viskositas; (a) pada pasta semen (Struble and Sun, 1995), dan (b) perbandingan pasta semen dan *geopolymer* metakaolin (Favier et al., 2014).

Pada pasta semen, perbandingan air dan semen merupakan faktor yang menentukan viskositasnya, dimana rasio air semen yang disarankan untuk bahan *grouting* adalah 0,75-1,5 (Zhang et al., 2018). Namun pada *geopolymer* lebih kompleks, selain perbandingan pelarut (aktivator) dan *fly ash*, komposisi bahan

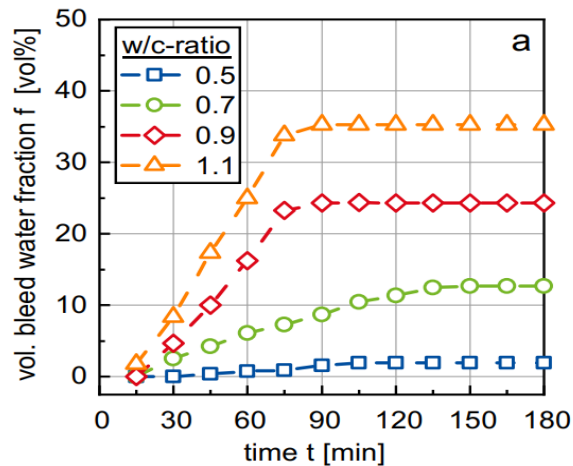
aktivator juga berpengaruh terhadap viskositas. Aktivator pada *geopolymer* merupakan campuran antara air, NaOH dan Na₂SiO₃, dimana perbedaan komposisi campuran aktivator berpengaruh terhadap nilai viskositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa viskositas *geopolymer* dipengaruhi oleh viskositas hidroksida, sedangkan perbandingan silikat dan hidroksida tidak banyak berpengaruh (Montes et al., 2012).

Tabel 2.5 Perbandingan viskositas pasta semen dan *geopolymer* dari penelitian sebelumnya

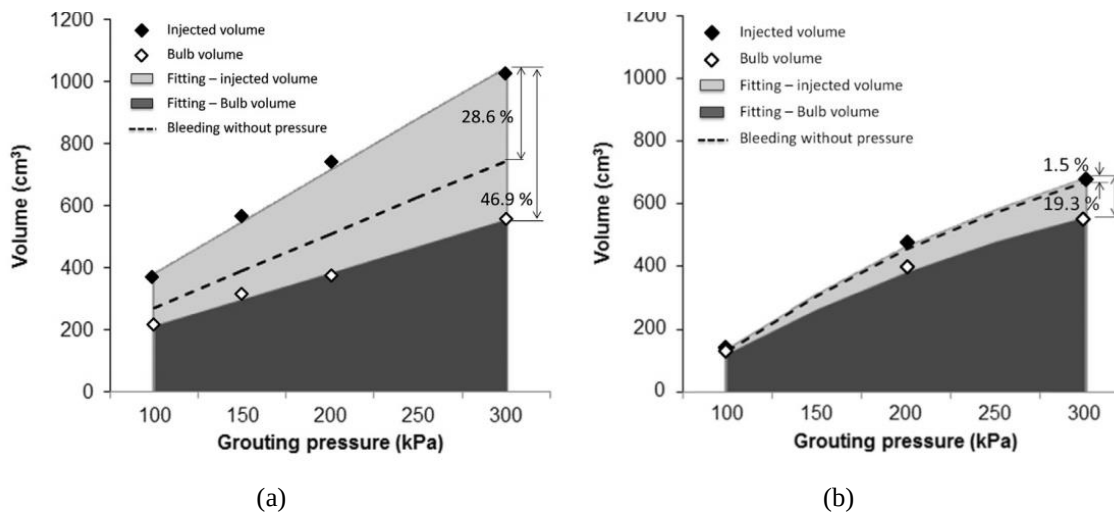
f_{PC} atau f_{GP}	Viskositas (mPa.s)		Sumber
	Pasta semen	<i>Geopolymer</i>	
0,35	190		(Shahriar and Nehdi, 2012)
0,4		7000	(Montes et al., 2012)
0,44	60		(Shahriar and Nehdi, 2012)
0,5	40		(Shahriar and Nehdi, 2012)
0,75	30		(Hamza et al., 2019)
1	15		(Hamza et al., 2019)
1,25	9,6		(Hamza et al., 2019)
1,5		10,5	(Hamza et al., 2019)
1,7		9,3	(Hamza et al., 2019)
2	8,9		(Hamza et al., 2019)
2,1		6,7	(Hamza et al., 2019)
2,5		5,5	(Hamza et al., 2019)

Pasta semen dibuat dengan mencampurkan semen dan air dengan perbandingan tertentu. Pada rasio air dan semen (f_{PC}) yang besar akan berpotensi bleeding, yaitu terjadi pemisahan antara semen dan air. Penelitian *bleeding* pada pasta semen seperti pada Gambar 2.14 menunjukkan bahwa semakin besar f_{PC} *bleeding* yang terjadi akan semakin besar pula (Bronk et al., 2020), dimana volume *bleeding* proporsional dengan besarnya f_{PC} . Penelitian injeksi pasta semen pada tanah pasir, *bleeding* yang terjadi mengalami peningkatan akibat adanya tekanan injeksi (Wang et al., 2016), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Kondisi *bleeding* pada injeksi pasta semen ini berdampak menurunkan nilai f_{PC} pasta semen.

Sedangkan pada *geopolymer* berbasis *fly ash* bleeding yang terjadi lebih rendah dari pada pasta semen (Zhang et al., 2019). Pada rasio *water-binder* sebesar 1 dan NaOH 4 M, *bleeding* hanya sebesar 0,5%. Volume *bleeding* pada *geopolymer* berbanding terbalik dengan molaritas dari NaOH, sehingga pada molaritas yang lebih besar, *bleeding* semakin kecil.



Gambar 2.14 Hubungan antara volume *bleeding* dan waktu pada pasta semen dengan variasi rasio air semen.

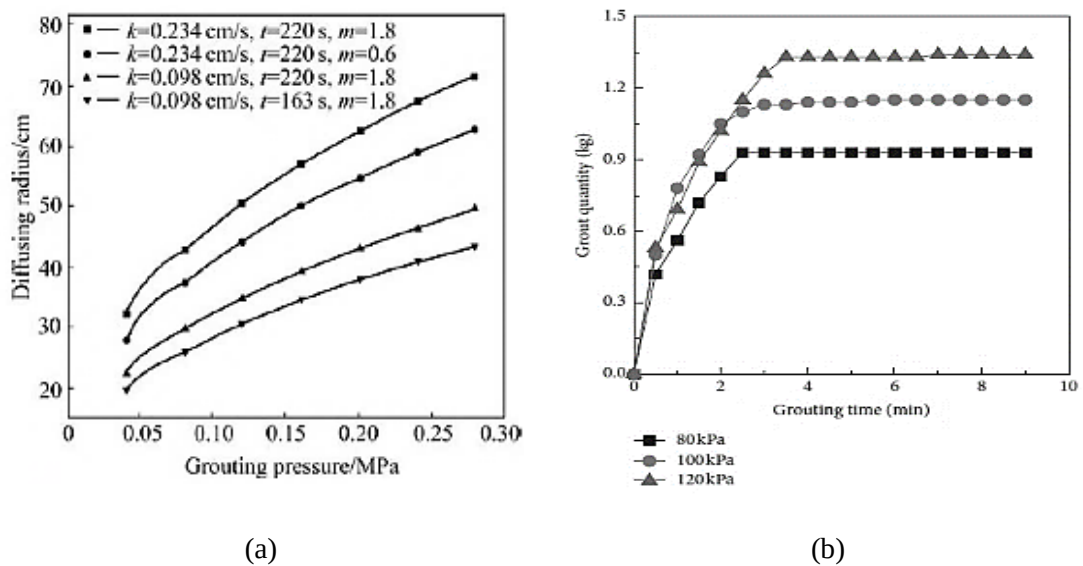


Gambar 2.15 Volume *bleeding* akibat tekanan pada injeksi pasta semen pada tanah pasir: (a) $f_{PC} = 1$, dan (b) $f_{PC} = 0,5$ (Wang et al., 2016).

2.1.4.3. Aspek Injeksi

Tekanan dibutuhkan untuk mendorong *grouting* sehingga mengalir, menyebar dan mengisi pori-pori tanah, selama durasi tertentu. Berdasarkan Persamaan 2.3, semakin besar tekanan, radius injeksi semakin besar. Penelitian injeksi pada kerikil berpasir (Gambar 2.16.a), menunjukkan bahwa semakin besar tekanan, radius injeksi semakin besar pula (Ping et al., 2008). Namun demikian, tekanan injeksi perlu dibatasi agar tidak terjadi fraktur (Raju and Valluri, 2008; Park and Oh, 2018).

Berdasarkan Persamaan 2.3 tidak ada batasan durasi. Namun demikian, waktu ikat bahan injeksi merupakan parameter yang akan membatasi durasi injeksi. Hasil penelitian injeksi semen pada tanah pasir menunjukkan bahwa injeksi akan berhenti setelah waktu tertentu (Fu et al., 2019), dimana hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa proses injeksi berhenti setelah durasi kurang lebih 3 - 4 menit (Gambar 2.16.b). Durasi tersebut tentunya masih terlalu singkat jika dibandingkan waktu ikat awal. Pada injeksi *grouting*, efek *clogging* akan terjadi selama proses injeksi (Kwon et al., 2018). Bahan *grouting* yang akan mengalir dan mengisi pori-pori ini sehingga menghambat proses selanjutnya, hambatan ini semakin lama semakin besar. Selain itu viskositas *grouting* semakin lama akan mengalami peningkatan sehingga kecepatan *grouting* akan mengalami penurunan (Lv et al., 2021).



Gambar 2.16 (a) Hubungan tekanan injeksi dan radius sebaran pada injeksi kerikil berpasir (Ping et al., 2008) dan (b) hubungan antara waktu injeksi dan jumlah semen grouting yang berhasil di injeksikan pada tanah pasir, dengan rasio air semen 2,0 (Fu et al., 2019).

Merujuk pada Persamaan 2.3, radius lubang bor berpengaruh terhadap radius sebaran *grouting*. Injeksi pada tanah pasir akan menghasilkan radius sebaran injeksi yang jauh lebih besar dari pada radius lubang bor (Hou et al., 2019), sehingga untuk penyederhanaan variabel radius lubang injeksi dapat diabaikan (Hou et al., 2019; Yang et al., 2019). Namun demikian, radius sebaran injeksi pada *clay shale* dimungkinkan tidak sebesar pada tanah pasir, sehingga pengaruh lubang injeksi perlu diperhitungkan.

2.1.4.4. Injeksi di Laboratorium

Beberapa penelitian eksperimen injeksi di laboratorium menggunakan tabung dengan ukuran diameter antara 5 - 20 cm, dan tinggi antara 10 - 30 cm. Penelitian injeksi tanah pasir oleh Wang et al. (2016) menggunakan ukuran diameter 20 cm dan tinggi 30. Penelitian injeksi pada *mudstone* oleh Pan et al. (2016) menggunakan diameter 6 cm dan tinggi 12 cm. Penelitian injeksi pada tanah lempung oleh Soga et al. (2004) menggunakan ukuran diameter 5 cm dan tinggi 10 cm. Injeksi pada *clay shale* dimaksudkan untuk meningkatkan kuat dukung, sehingga uji kuat dukung setelah injeksi perlu dilakukan, sehingga menjadi pertimbangan dalam menentukan ukuran benda uji. Uji tekan bebas merupakan metode uji kuat dukung tanah yang banyak digunakan. Diameter minimal untuk uji tekan bebas adalah 3 cm dengan tinggi antara 2 – 2,5 kali diameter (BSN, 2012), sedangkan diameter maksimum berkaitan dengan kapasitas alat uji.

Eksperimen di laboratorium umumnya dilakukan dalam tabung injeksi sehingga pengembangan tanah dibatasi oleh tabung. Beberapa penelitian di laboratorium menggunakan tekanan yang bervariasi, yaitu antara 10 – 500 kPa. Tekanan yang digunakan pada injeksi semen pada tanah pasir oleh Arora and Kumar (2015) adalah sebesar 500 kPa, sedangkan Boschi et al. (2020) menggunakan tekanan 100 kPa dan 300 kPa, dan Kordnaeij et al. (2019) menggunakan tekanan sebesar 10-50 kPa. Tekanan injeksi yang dimaksudkan untuk memperbaiki tanah *clay shale* yang mengalami pelapukan disesuaikan dengan kedalaman pelapukan. Menurut penelitian Wan et al. (2019) pelapukan batuan sedimen kurang lebih sampai kedalaman 4-5 m, sehingga acuan tekanan injeksi adalah 80-100 kPa.

2.1.5. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah dilakukan sebagai upaya untuk memperbaiki sifat-sifat fisik dan mekanik tanah (Ingles and Metcalf, 1972). Metode stabilisasi umumnya dilakukan dengan mencampurkan (*mixing*) bahan stabilisasi pada tanah. Stabilisasi semen pada tanah pasir maupun lempung berhasil meningkatkan nilai kuat dukung yang sebanding dengan kadar semen yang dicampurkan (Ingles and Metcalf, 1972). Peningkatan kuat dukung terjadi akibat adanya ikatan antar butiran pasir yang dibentuk oleh pasta semen yang dipengaruhi oleh adhesi antara semen dan tanah, dimana nilainya mempunyai korelasi dengan selisih porositas sebelum dan sesudah stabilisasi (Hicher et al., 2008).

Stabilisasi tanah lempung menggunakan semen berhasil meningkatkan kuat dukung, dengan kadar semen optimum 11% dan pada kadar air 1,2 OMC (Horpibulsuk et al., 2010). Selain itu, stabilisasi semen juga berhasil meningkatkan durabilitasnya (Siregar et al., 2018).

Penelitian stabilisasi pada *mud rock* mulai dilakukan yang merupakan upaya memperbaiki kuat dukung batuan yang telah mengalami degradasi. Penelitian stabilisasi pada *silt stone* dengan semen, optimum pada kadar 12% dengan kuat dukung meningkat dari 34 kPa menjadi 849 kPa (Hartono et al., 2018). Penelitian stabilisasi *clay shale* dengan semen juga berhasil meningkatkan kuat dukungnya (Hartono et al., 2017; Faray and Rahayu, 2020; Fathurrohman et al., 2020). Beberapa penelitian tersebut menunjukkan bahwa semen efektif untuk stabilisasi pada *clay shale*. Sedangkan penelitian stabilisasi menggunakan kapur dan abu sekam padi kurang efektif pada *clay shale* (Faray and Rahayu, 2020).

Stabilisasi tanah dengan menggunakan *geopolymer* mulai banyak dikembangkan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *geopolymer* dapat digunakan untuk stabilisasi tanah dan berhasil meningkatkan kuat dukungnya. Namun demikian terdapat perbedaan perilaku antara stabilisasi semen dan *geopolymer*. Kecepatan peningkatan kuat dukung pada stabilisasi *geopolymer* lebih lambat dari pada semen, namun pada jangka waktu lama kuat dukungnya dapat melampaui stabilisasi dengan semen (Cristelo et al., 2013; Arulrajah et al., 2018). Stabilisasi tanah dengan semen maupun *geopolymer* memerlukan kadar binder yang cukup untuk sementasi. Namun demikian, kadar optimum stabilisasi dengan *geopolymer* lebih tinggi dari pada semen, dimana kadar semen optimum pada kisaran 10%, sedangkan stabilisasi dengan *geopolymer* memerlukan kadar *binder* yang lebih tinggi yaitu pada kisaran 15-30%. (Phetchuay et al., 2016; Arulrajah et al., 2018; Arun et al., 2019; Canakci et al., 2019; Murmu et al., 2019).

Kondisi kadar air tanah berpengaruh pada stabilisasi tanah dengan *geopolymer*, dimana stabilisasi lebih efektif pada tanah pada sisi kering (Ghadir and Ranjbar, 2018), hal ini berbeda dengan stabilisasi dengan semen yang lebih efektif pada kadar air optimum. Selain itu stabilisasi tanah dengan *geopolymer* membutuhkan aktivator yang lebih banyak dari pada *geopolymer* murni, hal ini karena sebagian aktivator terserap tanah. Selain itu penambahan air akan mengakibatkan proses *dissolution* terhambat oleh

menurunnya konsentrasi NaOH, sehingga banyak *fly ash* yang tidak bereaksi (Leong et al., 2018).

2.1.6. Kolom Grouting

Kolom *grouting* terbentuk oleh ikatan antar butiran tanah yang terikat oleh *grouting* yang menyebar pada pori-pori tanah. Tekanan injeksi akan mendorong *grouting* menyebar dan mengisi pori-pori sampai radius tertentu (Hou et al., 2019; Zhang et al., 2020; Du et al., 2022). Semakin jauh radius injeksi, kolom *grouting* yang terbentuk oleh ikatan bahan *grouting* akan semakin besar.

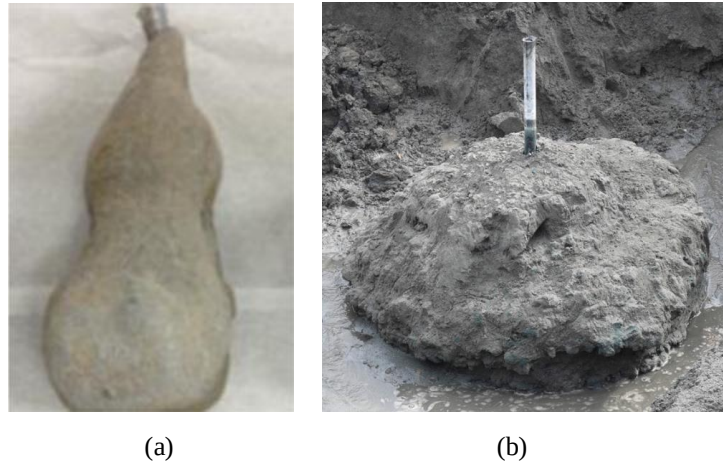
2.1.6.1. Metode Jar test

Deteksi ukuran kolom *grouting* hasil injeksi tanah pasir dapat dengan mudah dilakukan. Pada pengujian di laboratorium, kolom *grouting* dipisahkan dari bagian yang tidak terjangkau *grouting* (Wang et al., 2016), seperti disajikan pada (Gambar 2.17a). Untuk pelaksanaan di lapangan, pengukuran kolom *grouting* dilakukan dengan melakukan ekskavasi (Hashimoto et al., 2016), seperti disajikan pada (Gambar 2.17b). Metode *jar test* digunakan untuk memisahkan bagian tersementasi dan yang tidak tersementasi pada tanah *clay shale*. *Clay shale* pada kondisi terdegradasi penuh (grade V) akan hancur jika direndam air selama 15 menit (Mang and Rafek, 2018), sehingga menyisakan bagian yang tersementasi (kolom *grouting*). Pengukuran volume kolom *grouting* dapat dilakukan dengan metode *clod method*, yaitu benda uji dilapisi lilin dan ditimbang di dalam air (Uteau et al., 2013). Analisis hitungan volume kolom *grouting* (V_{cg}) disajikan pada Persamaan 2.13.

$$V_{cg} = \frac{W_3 - W_2}{\gamma_w} - \frac{W_2 - W_1}{\gamma_p} \quad (2.13)$$

Keterangan

- V_{cg} = volume kolom *grouting* (undegraded) (cm^3)
- W_1 = berat pada udara terbuka tanpa lapisan lilin (gr)
- W_2 = berat pada udara terbuka pada kondisi dilapisi lilin (gr)
- W_3 = berat di dalam air dengan kondisi dilapisi lilin (gr)
- γ_w = berat satuan air (gr/cm^3)
- γ_p = berat satuan lilin (gr/cm^3)



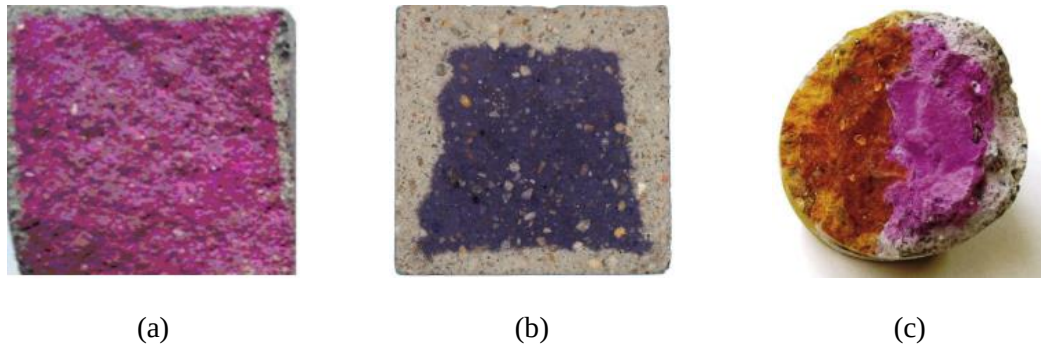
Gambar 2.17 Kolom grouting pada injeksi tanah pasir: (a) hasil eksperimen laboratorium (Wang et al., 2016), dan (b) injeksi di lapangan (Hashimoto et al., 2016).

2.1.6.2. Metode *Phenolphthalein*

Kolom *grouting* yang terbentuk tentunya sebanding dengan radius sebaran bahan *grouting*. Pasta semen maupun *geopolymer* mempunyai sifat basa, sehingga keberadaannya dapat dideteksi dengan indikator basa. *Phenolphthalein* dengan kadar 1% merupakan indikator basa yang sering digunakan untuk mendeteksi kedalaman korosi CO₂ pada beton (Papadakis, 2000; Rukzon and Chindaprasirt, 2010; Nakarai and Yoshida, 2015; Šavija and Luković, 2016). Pada prinsipnya bahan yang bersifat basa jika disemprotkan indikator ini akan berubah warna menjadi merah magenta. Pada perkembangannya, selain untuk beton konvensional, *phenolphthalein* dapat digunakan untuk beton *geopolymer* (LI and LI, 2018). Metode ini memanfaatkan perubahan warna, sehingga dalam analisis luasan yang mengalami perubahan warna memerlukan pemrosesan gambar (*image processing*). Penggunaan software *image processing* akan mempermudah dalam analisis. Image-J merupakan salah satu software yang dapat digunakan untuk pengolahan gambar (Desiati et al., 2018; Sasri et al., 2018)

Selain *phenolphthalein*, *thymolphthalein* dan *curcumin* dapat digunakan sebagai alternatif dari *phenolphthalein*. *Thymolphthalein* merupakan bahan alternatif untuk menggantikan *phenolphthalein* (Revert et al., 2018). Larutan *thymolphthalein* dibuat dengan komposisi 1 gram *thymolphthalein*, 30 ml air dan 70 ml *ethanol*. Bahan lain yang dapat digunakan adalah *curcumin* yang dilarutkan dalam *etanol* dengan kadar 0,5% (Chinchón-Payá et al., 2016). Beton yang telah terkarbonasi akan berwarna kuning seperti

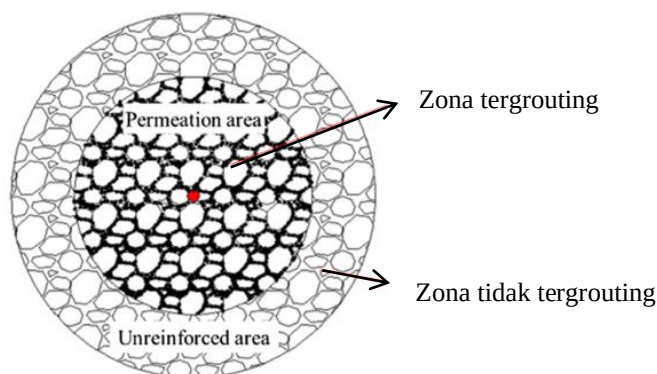
warna asli *curcumin*, sedangkan beton yang belum terkarbonasi akan berwarna lebih gelap kuning tua. Perubahan warna oleh masing-masing indikator pH disajikan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Hasil deteksi beton menggunakan sifat basa: (a) menggunakan indikator pH phenolphthalein (Rukzon and Chindaprasirt, 2010), (b) menggunakan indikator thymolphthalein (Revert et al., 2018), dan (c) perbandingan menggunakan curcumin dan phenolphthalein (Chinchón-Payá et al., 2016).

2.1.6.3. Metode Volume Injeksi

Setelah proses injeksi selesai, volume bahan *grouting* dapat dihitung berdasarkan berat *grouting* yang berhasil diinjeksikan dan berat satuannya. Volume injeksi (V_i) tersebut akan sama dengan volume lubang injeksi dan volume pori udara sampai radius kolom *grouting* (Gambar 2.19). Persamaan keseimbangan volume injeksi yang masuk dengan volume pori yang terisi disajikan pada Persamaan 2.14, dan radius injeksi disajikan pada Persamaan 2.15. Nilai R_i tersebut akan setara dengan radius kolom *grouting* (R_{cg}) jika bahan stabilisasi mampu membentuk ikatan dengan baik.



Gambar 2.19 Skema sebaran injeksi (Zhang et al., 2020).

$$V_i - V_b = n\pi L_b (R_i^2 - R_b^2) \quad (2.14)$$

$$R_i = \sqrt{\frac{V_i - \pi L_b R_b^2}{n\pi L_b} + R_b^2} \quad (2.15)$$

Keterangan

V_i = volume bahan stabilisasi yang berhasil diinjeksikan (mm^3)

V_b = volume lubang bor (mm^3)

n = porositas

L_b = kedalaman lubang bor (mm)

R_i = jari-jari sebaran bahan stabilisasi (mm)

R_b = jari-jari lubang bor (mm)

2.1.7. Pengujian Kuat Dukung

Injeksi *grouting* dilakukan untuk menyebarkan bahan *grouting* dan mengisi pori-pori dengan maksud meningkatkan kuat dukung tanah. Pengujian tekan bebas merupakan salah satu metode pengujian kuat dukung tanah yang relatif mudah dan cepat. Benda uji berbentuk silinder diberikan tekanan secara bertahap sampai mengalami keruntuhan. Besarnya kuat dukung tanah (q_u) merupakan tegangan desak maksimum yang dapat didukung benda uji. Hitungan besarnya kuat tekan (q_u), disajikan pada Persamaan 2.16. Pengujian tanah *clay shale* mengacu pada standar pengujian untuk tanah kohesif (ASTM, 2000).

$$q_u = \frac{P_u}{A} \quad (2.16)$$

Keterangan :

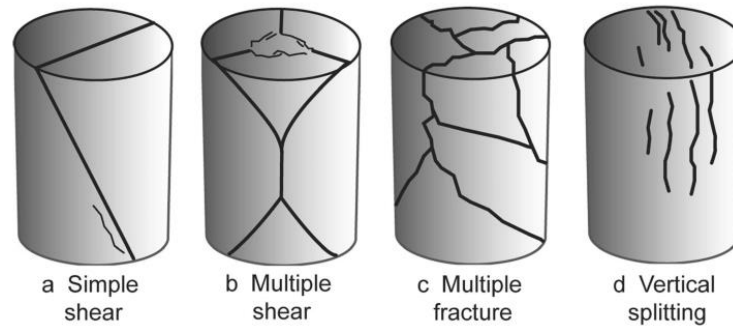
q_u : kuat dukung (kPa)

P_u : beban ultimit pengujian (kN)

A : luas tampang benda uji (m^2)

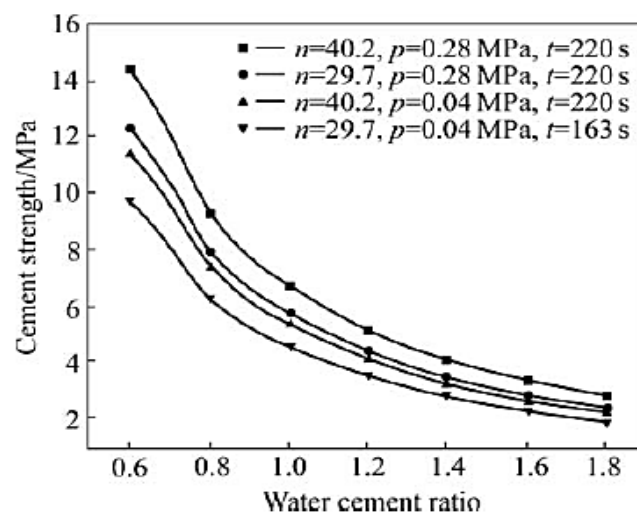
Pola keruntuhan dapat diamati selama pengujian tekan bebas. Secara umum pola keruntuhan dikelompokkan dalam 4 jenis (Gambar 2.20), yaitu: *simple shear*, *multiple shears*, *multiple fractures*, dan *vertical splitting* (Szwedzicki and Shamu, 1999; Stappen et al., 2019). Pola keruntuhan menunjukkan posisi bagian paling lemah atau bidang

diskontinu, dimana *simple shear* mengindikasikan benda uji relatif seragam sedangkan *vertical splitting* mengindikasikan terjadinya bidang diskontinu (Stappen et al., 2019).



Gambar 2.20 Tipe keruntuhan pada uji tekan bebas (Stappen et al., 2019).

Kolom *grouting* yang terbentuk pada injeksi *grouting* akan meningkatkan kuat dukung yang dihasilkan. Semakin besar kolom *grouting*, jumlah tanah yang tersementasi semakin besar pula sehingga peningkatan kuat dukungnya semakin besar. Penggunaan pasta semen atau *geopolymer* yang semakin encer akan berpotensi mendapatkan kolom *grouting* yang semakin besar. Namun demikian, penggunaan *grouting* yang semakin encer akan berisiko menurunkan kuat dukung (Ping et al., 2008), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Hubungan antara rasio air semen dan kuat dukung kerikil berpasir yang diinjeksi pasta semen (Ping et al., 2008).

Selain kuat dukung (q_u), analisis berdasarkan grafik tegangan dan regangan dapat diperoleh nilai modulus elastisitas (E), *brittleness index* (B_i) dan *Toughness* (T_g). Modulus elastisitas E_{50} dihitung berdasarkan tegangan sebesar 50% dari tegangan ultimit (σ_{50}) dan regangan pada saat pada σ_{50} , seperti pada Persamaan 2.17. Sedangkan *Brittleness* indeks merupakan parameter kegetasan material. Metode untuk menghitung *brittleness index* (B_i) telah banyak dikembangkan, paling tidak ada 80 formula dengan berbagai pengujian (Meng et al., 2020). Salah satu formula menggunakan data grafik tegangan regangan menggunakan regangan elastis (ϵ_e) dan regangan puncak (ϵ_u) hasil uji tekan bebas, seperti pada Persamaan 2.18 (Hucka and Das, 1974). Nilai *toughness* merupakan integral tegangan terhadap regangan seperti pada Persamaan 2.19.

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\epsilon_{50}} \quad (2.17)$$

$$B_i = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_u} \quad (2.18)$$

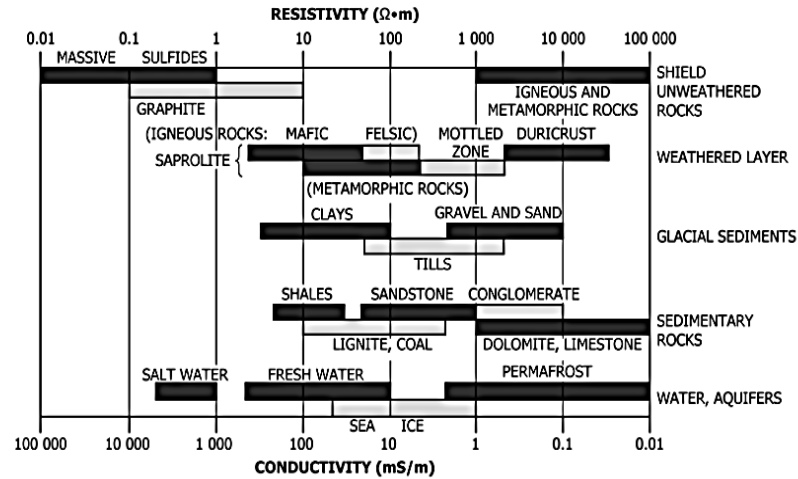
$$T_g = \int \sigma d\epsilon \quad (2.19)$$

Keterangan :

- E_{50} : modulus elastisitas pada σ_{50} (MPa)
- σ_{50} : tegangan 50% dari tegangan ultimit (kPa)
- ϵ_{50} : regangan pada saat σ_{50}
- B_i : *brittleness* indeks
- ϵ_e : regangan pada batas elastis
- ϵ_u : regangan pada tegangan ultimit
- T_g : *toughness* (kPa)

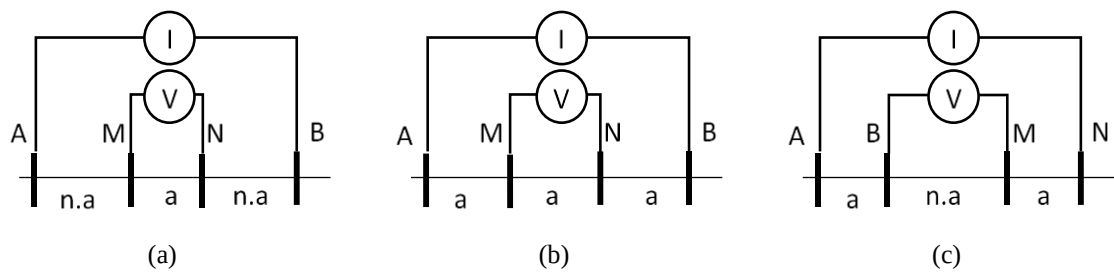
2.1.8. Metode Resistivity

Metode *resistivity* (R_o) merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam survey geofisika (Telford et al., 1990). Pada metode ini, interpretasi lapisan batuan didasarkan pada perbedaan nilai *resistivity*, dimana beberapa material memiliki rentang tertentu (Gambar 2.22).



Gambar 2.22 Tipikal nilai *resistivity* material (ASTM, 2018).

Pada pengukuran sampel di laboratorium secara *uniaxial*, nilai *resistivity* (hambatan jenis) dihitung dengan Persamaan 2.20 dan 2.21. Pengujian *resistivity* di lapangan umumnya dilakukan dengan 4 (elektroda), dengan A dan B merupakan elektroda arus, sedangkan M dan N adalah elektroda untuk mengukur beda potensial (ASTM, 2018). Berdasarkan formasi dari elektrodanya metode ini terdiri atas metode Schlumberger, Wenner, dan Dipole-dipole (Gambar 2.23). Hitungan nilai R_o untuk metode Schlumberger, Wenner, dan Dipole-dipole, masing-masing disajikan pada Persamaan 2.22, Persamaan 2.23 dan Persamaan 2.24 (Telford et al., 1990).



Gambar 2.23 Susunan elektroda pada: (a) metode Schlumberger, (b) Wenner, dan (c) Dipole-dipole (Telford et al., 1990).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.20)$$

$$R_o = R \frac{A}{L} \quad (2.21)$$

$$R_o = \frac{V}{I} \pi a n (n + 1) \quad (2.22)$$

$$R_o = \frac{V}{I} 2\pi a \quad (2.23)$$

$$R_o = \frac{V}{I} \pi a n (n + 1) (2 + n) \quad (2.24)$$

Keterangan :

- R : hambatan listrik (Ω)
- Ro : hambatan jenis listrik ($\Omega.m$)
- A : luas tampang benda (m^2)
- V : beda potensial listrik (volt)
- I : besar arus listrik (A)
- L : panjang benda uji (m)
- a : jarak elektroda terkecil pada formasi empat elektroda (m)
- n : perbandingan jarak elektroda

Selain untuk melakukan pemetaan pelapisan batuan, metode *resistivity* dengan 4 elektroda telah banyak dipakai dalam bidang geoteknik antara lain prediksi bidang longsor pada lereng berdasarkan lapisan batuan (Iqbal and Budiman, 2013), analisis lapisan tanah penyebab terjadinya ambles pada jalan (Santoso, 2016), dan monitoring kadar air di bawah permukaan (Gunn et al., 2015). Pada perkembangannya, metode 4 elektroda digunakan juga untuk pengujian *resistivity* material di laboratorium, antara lain pengujian *resistivity* pada beton (Layssi et al., 2015), *geopolymer* (Wen and Chung, 2001) dan *resistivity* pada sampel tanah (Vincent et al., 2017; Mostafa et al., 2018).

Untuk interpretasi formasi arah vertikal seperti *dyke* maupun rekahan pada batuan, metode Schlumberger paling cocok digunakan (Telford et al., 1990; Batayneh, 2001; Nunes et al., 2016). Formasi *dyke* merupakan formasi batuan yang berbentuk kolom vertikal di dalam tanah. Formasi batuan *dyke* memiliki perbedaan *resistivity* antara kolom *dyke* dengan tanah sekitarnya sehingga dapat dideteksi dengan metode geolistrik *resistivity*.

Uji *resistivity* pada tanah yang diinjeksi *geopolymer* akan dipengaruhi oleh *resistivity* kedua material tersebut. *Resistivity geopolymer* dipengaruhi oleh material

binder dan aktivatornya. Sifat *amorphous* dari bahan *binder* menyebabkan *geopolymer* mempunyai sifat polarisasi, sehingga pengukuran *resistivity* memerlukan waktu yang lama (Cai et al., 2020). Selain itu, *resistivity geopolymer* semakin tinggi pada umur yang semakin lama (Cai et al., 2020).

Selain jenis tanah, kepadatan dan kadar air merupakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap nilai *resistivity* tanah. Pada kondisi kering, *resistivity* semakin tinggi untuk tanah yang semakin padat (Kuranchie et al., 2014; Mostafa et al., 2018). Namun pada kondisi basah, kepadatan yang meningkat akan menurunkan nilai *resistivity*, hal ini karena derajat kejenuhannya meningkat (Mostafa et al., 2018). Pada kondisi basah, keberadaan air pada tanah berfungsi sebagai penghantar sehingga nilai *resistivity* menurun (McCarter, 1984; Zohra-Hadjadj et al., 2019).

2.1.9. Analisis Data dan Interpretasi

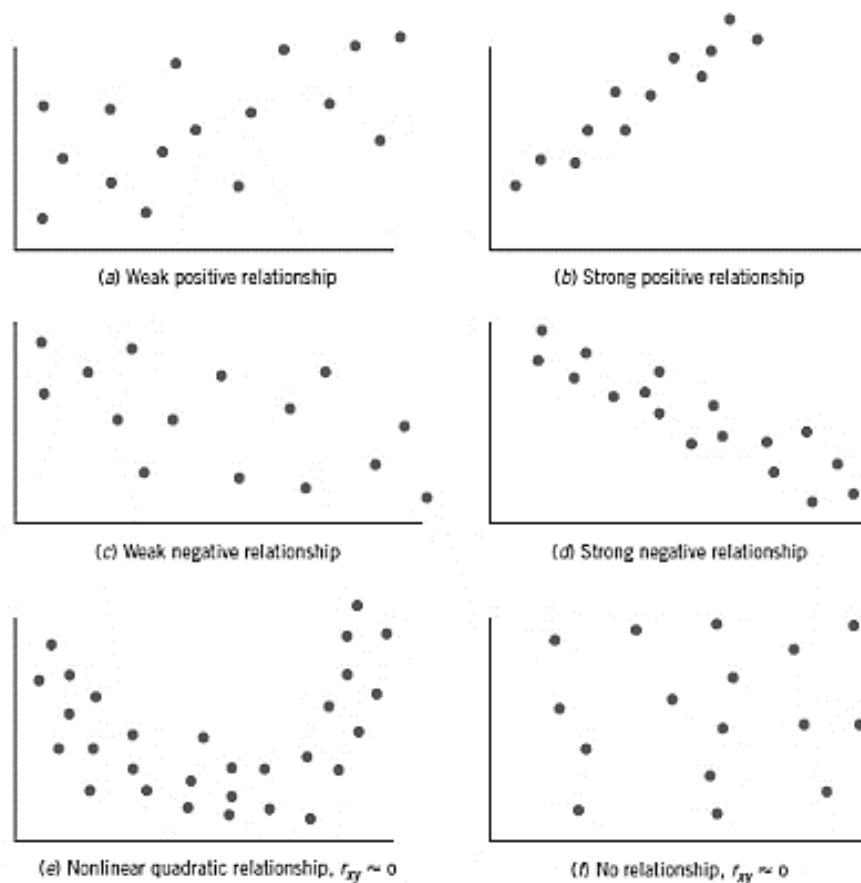
Hubungan antar variabel dapat dinyatakan berdasarkan nilai korelasi, dengan nilai korelasi (Cor) tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 2.25 (Chatterjee and Hadi, 2012). Rentang nilai korelasi berada pada nilai -1 sampai 1. Korelasi dengan nilai negatif (-) menunjukkan hubungan kedua variabel adalah berbanding terbalik, sedangkan nilai positif (+) menunjukkan hubungan kedua variabel adalah berbanding lurus. Semakin besar nilai absolut dari korelasi menunjukkan hubungan yang semakin kuat.

$$Cor = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2 \sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.25)$$

Interpretasi hasil pengujian dilakukan berdasarkan nilai korelasi, plot sebaran data dan analisis regresi. Hubungan dua variabel secara kuantitatif dapat dilihat dari nilai korelasinya, dimana semakin besar nilai korelasi berarti semakin kuat hubungan kedua variabel tersebut. Tingkat hubungan variabel berdasarkan nilai korelasi dikelompokkan dalam 5 (lima) grade, yaitu:

- a) Sangat lemah untuk nilai korelasi 0 sampai 0,2.
- b) Lemah untuk nilai korelasi di atas 0,2 sampai 0,4.
- c) Sedang untuk nilai korelasi di atas 0,4 sampai 0,6.
- d) Kuat untuk nilai korelasi diatas 0,6 sampai 0,8.
- e) Sangat kuat untuk nilai korelasi di atas 0,8.

Untuk nilai korelasi antara 0 sampai dengan 0,2 hubungan kedua variabel tersebut sangat lemah sehingga dapat diabaikan. Namun demikian perlu dilakukan verifikasi terhadap pola sebaran datanya terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan analisis korelasi menggunakan pola hubungan linear, sehingga data dengan pola sebaran yang tidak linear nilai korelasinya akan bernilai rendah (Montgomery and Runger, 2014). Ilustrasi hubungan nilai korelasi dan sebaran data disajikan pada Gambar 2.24. Nilai korelasi dua variabel yang membentuk pola kuadrat (Gambar 2.24) akan relatif kecil, hal ini dikarenakan nilai korelasi dihasilkan berdasarkan hubungan linear. Namun demikian korelasi ini cukup sederhana sehingga mudah diaplikasikan. Untuk menghindari kesalahan interpretasi, selain menggunakan nilai korelasi perlu diamati pola sebaran atau dengan persamaan regresi.



Gambar 2.24 Hubungan antara pola sebaran data dan nilai korelasinya (Montgomery and Runger, 2014).

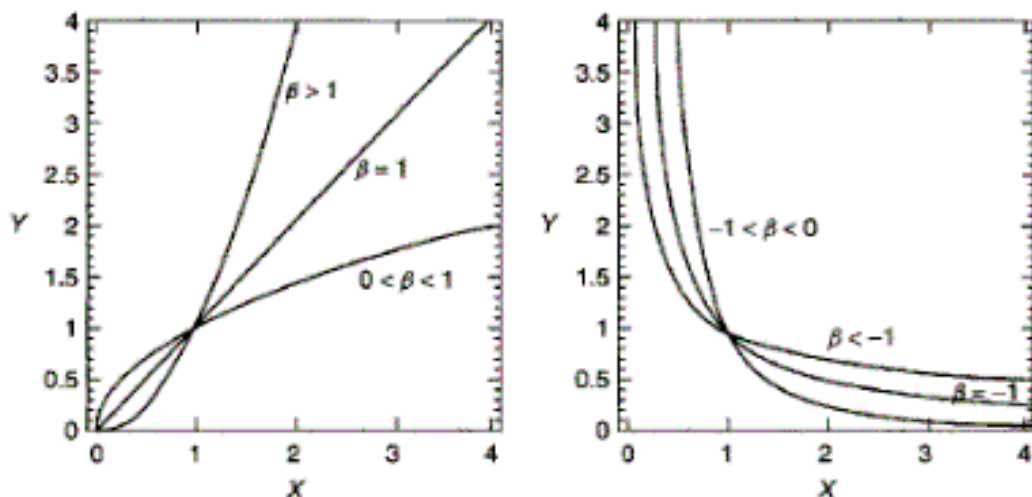
2.1.9.1. Analisis Regresi

Analisis regresi merupakan model hubungan antara dua variabel atau lebih berdasarkan data observasi. Persamaan regresi merupakan pola yang mewakili hubungan antar variabel. Beberapa persamaan regresi yang dikenal antara lain regresi linear, polinomial, non linear, dan logistik (Chatterjee and Hadi, 2012). Persamaan regresi dibuat dengan mempertimbangkan pola sebaran data, teori yang berlaku dan kondisi batas.

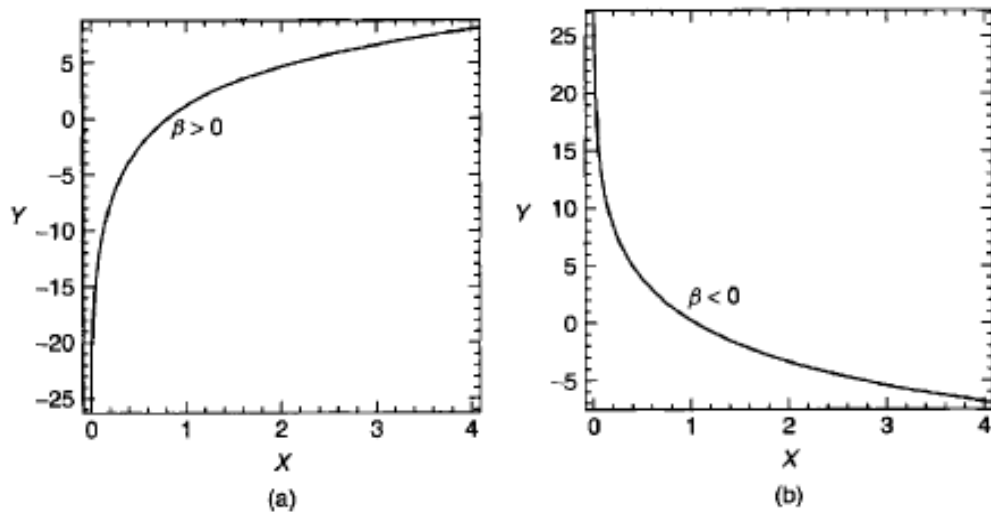
Persamaan non linear yang sering digunakan adalah persamaan eksponensial dan logaritmik. Regresi eksponensial dan logaritmik disajikan pada Persamaan 2.26 dan Persamaan 2.27, sedangkan ilustrasi grafik regresinya disajikan pada Gambar 2.25 dan Gambar 2.26. Persamaan ini cocok untuk memodelkan pengaruh variabel x yang laju pengaruhnya terhadap variabel y berubah secara gradual. Pengaruh umur (variabel x) terhadap kuat dukung hasil stabilisasi (variabel y) umumnya cocok menggunakan persamaan ini.

$$y = \alpha \cdot x^{\beta} \quad (2.26)$$

$$y = \alpha + \beta \cdot \log(x) \quad (2.27)$$



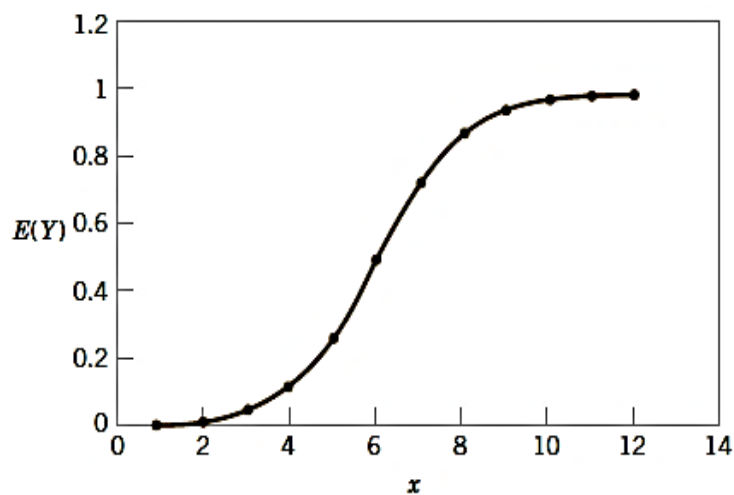
Gambar 2.25 Ilustrasi grafik fungsi eksponensial dengan berbagai nilai β (Chatterjee and Hadi, 2012).



Gambar 2.26 Ilustrasi grafik fungsi logaritmik dengan berbagai nilai β (Chatterjee and Hadi, 2012).

Persamaan logistik digunakan untuk pola data (x,y) di mana pada awalnya pengaruh variabel x terhadap variabel y kecil, kemudian membesar dan mengecil kembali pada nilai x yang besar. Persamaan umum fungsi logistik disajikan dalam Persamaan 2.28, dan ilustrasi grafik disajikan pada Gambar 2.27. Grafik ini cocok untuk menganalisis pengaruh kadar bahan stabilisasi hasil stabilisasi (Hartono et al., 2019).

$$E(Y) = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 - \beta_1 \cdot x)]} \quad (2.28)$$



Gambar 2.27 Ilustrasi grafik logistik (Montgomery and Runger, 2014).

Evaluasi terhadap hasil regresi dilakukan pada beberapa indikator, yaitu nilai determinasi dari persamaan regresi (R^2) dan konstitutif hubungan kedua variabel. Pada prinsipnya semakin besar nilai R^2 menunjukkan variabel terikat mempunyai hubungan (pengaruh) yang kuat dengan variabel bebasnya. Nilai R^2 ini sering disebut dengan *goodness of fit index* (Chatterjee and Hadi, 2012). Selain itu nilai R^2 , konstitutif hubungan kedua variabel (teori) dan nilai batas menjadi pertimbangan dalam menentukan persamaan regresi.

2.1.9.2. Analisis Non Dimensional

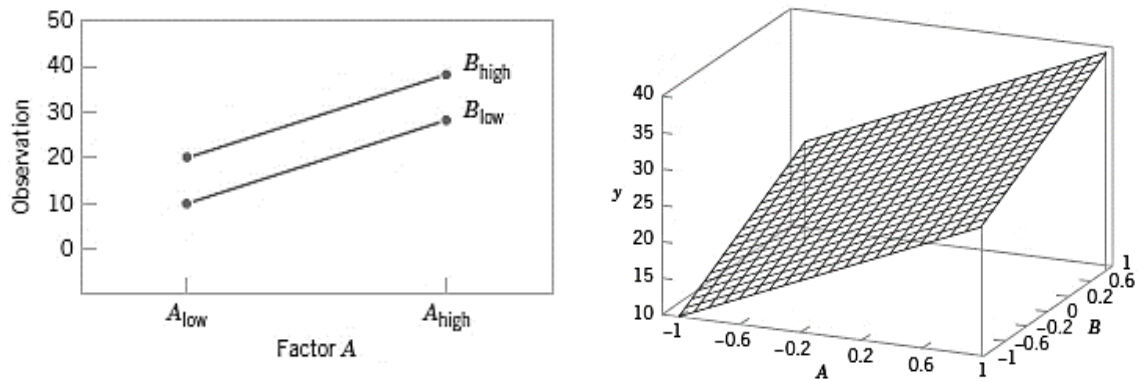
Berdasarkan teori Pi Buckingham, penyelesaian persamaan dimensional dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan non dimensional (Sabnis et al., 1983). Persamaan fungsi F yang tersusun atas sejumlah m variabel berdimensi (X) seperti pada Persamaan 2.29, dapat disajikan menjadi persamaan fungsi G dengan variabel non dimensional (Π) (Persamaan 2.30).

$$F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) = 0 \quad (2.29)$$

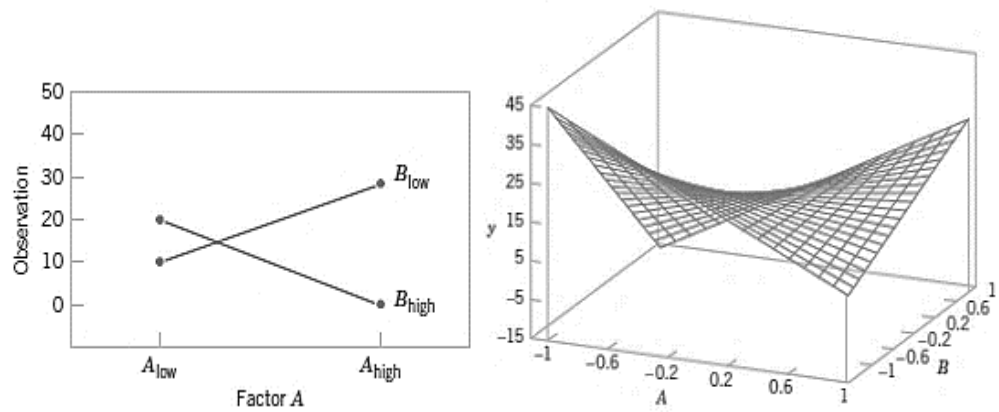
$$G(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) = 0 \quad (2.30)$$

2.1.9.3. Interpretasi

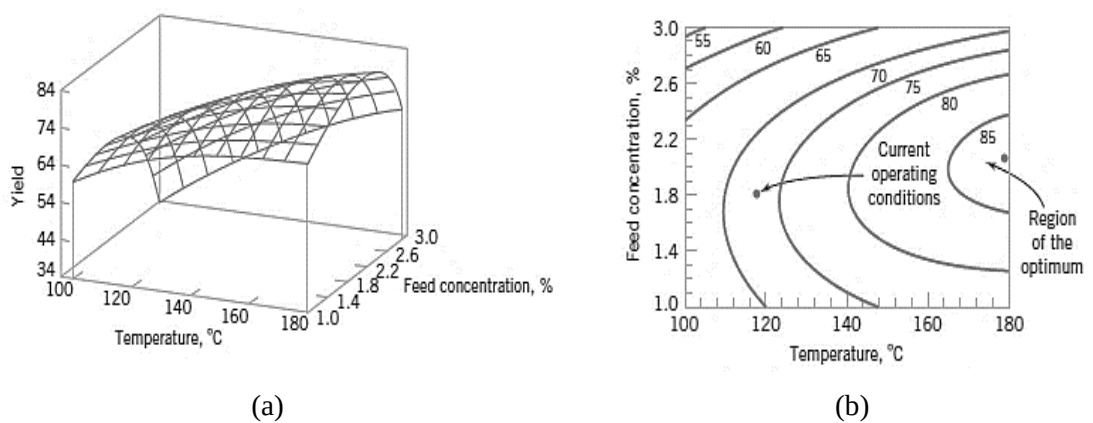
Analisis regresi menghasilkan persamaan regresi, grafik regresi dan nilai determinasi (R^2). Semakin besar nilai R^2 persamaan regresi yang dihasilkan semakin baik. Pengaruh variabel bebas (X) terhadap variabel terikat (Y) dipelajari berdasarkan persamaan regresi yang dihasilkan, dan bentuk grafik regresinya. Dalam eksperimen, hasil observasi (variabel terikat) dapat dipengaruhi oleh lebih dari satu faktor (variabel bebas). Antar variabel bebas ada dua kemungkinan yaitu terjadi interaksi dan tidak ada interaksi antar variabel bebas. Ilustrasi pola data dengan dua variabel bebas yang tidak ada interaksi disajikan pada Gambar 2.28, sedangkan yang ada interaksinya disajikan pada Gambar 2.29. Untuk interpretasi dengan pada dua variabel bebas (dua faktor), diamati dalam bentuk grafik 3D atau grafik dalam bentuk kontur (Gambar 2.30).



Gambar 2.28 Ilustrasi dua variabel bebas yang tidak ada interaksi (Montgomery and Runger, 2014).



Gambar 2.29 Ilustrasi dua variabel bebas yang ada interaksi (Montgomery and Runger, 2014).

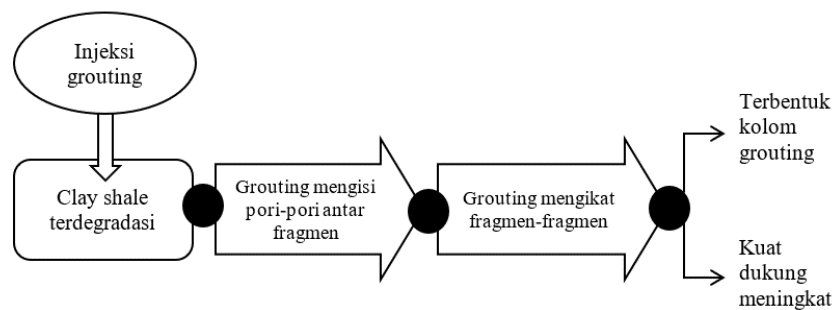


Gambar 2.30 Ilustrasi pola hubungan dua variabel bebas terhadap satu variabel terikat dalam bentuk: (a) grafik 3D dan (b) grafik bentuk kontur (Montgomery and Runger, 2014).

2.2. Kerangka Pikir

Clay shale pada kondisi terbuka akan mengalami proses pelapukan sehingga berakibat terjadinya degradasi dan menurunnya kuat dukung. Stabilisasi dengan mencampurkan bahan stabilisasi (metode *mixing*) sulit dilakukan sampai kedalaman terdegradasi. Selain itu, permasalahan akibat degradasi ini biasanya baru muncul pada fase operasional sehingga menambah kesulitan penggunaan metode *mixing*. Berdasarkan permasalahan tersebut, metode injeksi *grouting* diusulkan sebagai solusi pemecahan masalah tersebut.

Penyelesaian masalah tersebut dilakukan dengan injeksi *grouting* untuk mengisi pori-pori antar fragmen, dengan alur kerangka pikir disajikan pada Gambar 2.31. Injeksi *grouting* akan menyebar dan mengisi pori-pori antar fragmen. Bahan *grouting* akan membentuk ikatan antar fragmen, sehingga terbentuk kolom *grouting* dan kuat dukungnya meningkat.



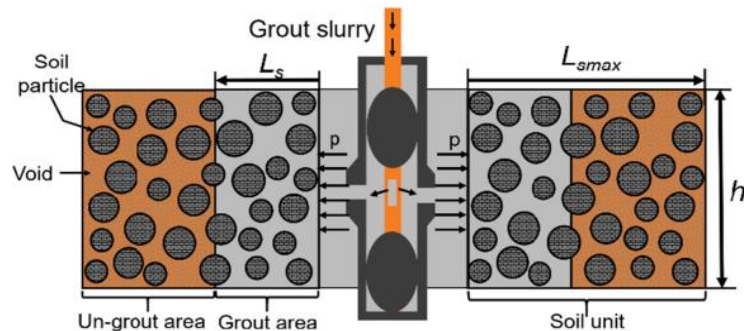
Gambar 2.31 Alur pikir penyelesaian masalah.

2.2.1. Konsep Pemecahan Masalah

Injeksi *grouting* pada penelitian ini merupakan metode pemecahan masalah pada *clay shale* yang telah mengalami degradasi, dimana *clay shale* dalam bentuk fragmen-fragmen seperti tanah granular. Metode injeksi *grouting* telah banyak dikaji dan berhasil untuk tanah granular, sehingga berpotensi digunakan pada *clay shale* yang terdegradasi. Prinsip metode injeksi *grouting* adalah mengalirkan bahan *grouting* ke dalam pori-pori tanah dengan memberikan tekanan. Tekanan injeksi mendorong *grouting* mengalir dari lubang injeksi ke dalam pori-pori antar fragmen *clay shale* (Gambar 2.32). Keberadaan *grouting* yang mengisi pori-pori akan mengikat fragmen-fragmen sehingga menjadi lebih kompak sehingga kuat dukungnya meningkat.

Secara tekstur, fragmen-fragmen *clay shale* menyerupai tanah granular seperti pasir dan kerikil sehingga mempunyai potensi untuk dilakukan injeksi *grouting*. Namun

demikian, *clay shale* tersusun atas mineral lempung sehingga perilaku pada injeksi *grouting* dapat berbeda dengan tanah pasir maupun kerikil. Berdasarkan kondisi tersebut, injeksi *grouting* pada *clay shale* merupakan metode alternatif sebagai solusi permasalahan degradasi *clay shale*, namun masih perlu dilakukan penelitian.



Gambar 2.32 Ilustrasi injeksi *grouting* pada *clay shale* yang telah terdegradasi (Du et al., 2022).

2.2.1.1. Konsep Injeksi *Grouting*

Proses injeksi *grouting* dilakukan dengan mendorong bahan *grouting* agar dapat mengalir dan mengisi pori-pori tanah. Bahan *grouting* yang berada pada pori-pori tanah akan mengikat tanah sehingga membentuk kolom *grouting* sehingga meningkatkan kuat dukungnya. Penelitian diperlukan untuk mempelajari variabel-variabel yang berpengaruh pada keberhasilan injeksi, yaitu keberhasilan proses injeksi, keberhasilan sementasi dalam pembentukan kolom *grouting* dan indikator akhir adalah peningkatan kuat dukung. Analisis keberhasilan diamati berdasarkan indikator keberhasilan (variabel terikat) pada masing-masing tahap, yaitu:

- Volume injeksi sebagai indikator keberhasilan proses injeksi,
- Radius kolom *grouting* sebagai indikator sementasi pembentukan kolom *grouting*, dan
- Kuat dukung sebagai indikator utama dari keberhasilan injeksi.

Indikator-indikator tersebut saling berkaitan, dimana volume injeksi akan berpengaruh terhadap ukuran kolom *grouting* (Yang et al., 2019), sehingga variabel yang berpengaruh terhadap volume injeksi akan mempengaruhi ukuran kolom *grouting*. Kuat dukung setelah injeksi tentunya dipengaruhi oleh ukuran kolom *grouting*. Selain itu kuat dukung yang dihasilkan dipengaruhi oleh kepadatan tanah, kuat dukung tanah, dan kuat dukung *grouting* (Kaga and Yonekura, 1992; Dano et al., 2004). Perbandingan campuran

pada *grouting* merupakan variabel yang menentukan kuat dukung *grouting*, dimana semakin tinggi kadar semen (*binder*) kuat dukung semakin tinggi (Dano et al., 2004).

2.2.1.2. Konsep Variabel Injeksi

Injeksi melibatkan tiga aspek yaitu tanah, *grouting*, dan metode injeksi. Variabel-variabel pada masing-masing aspek tersebut dipelajari pengaruhnya terhadap volume injeksi. Variabel-variabel yang dipelajari pengaruhnya (variabel bebas) terhadap keberhasilan injeksi adalah:

a) Porositas dan kepadatan

Nilai porositas berkaitan dengan kepadatan dengan hubungan berbanding terbalik. Semakin besar porositas berarti volume *grouting* yang mungkin diinjeksikan semakin besar, porositas juga mempengaruhi kemudahan aliran *grouting* sehingga porositas merupakan variabel yang perlu dipelajari pengaruhnya terhadap volume injeksi.

b) Kadar air

Kadar air berpengaruh terhadap komposisi volume udara dan air pada pori-pori tanah, dimana pengisian *grouting* pada pori udara lebih mudah dari pada pori yang berisi air. Berdasarkan perbedaan perilaku tersebut, pengaruh kadar air perlu dipelajari.

c) Jenis bahan *grouting*

Jenis bahan *grouting* tentunya berpengaruh terhadap viskositasnya. Pada penelitian ini dipelajari terhadap dua jenis *grouting* yaitu pasta semen dan *geopolymer*

d) Rasio campuran bahan dan viskositas

Rasio air terhadap semen berpengaruh terhadap nilai viskositasnya, sehingga variabel ini perlu dipelajari pengaruhnya. Untuk *geopolymer*, variabel yang dipelajari adalah rasio aktivator *fly ash*.

e) Tekanan

Tekanan diperlukan untuk mendorong *grouting* mengalir dalam pori-pori tanah, sehingga pengaruh besarnya tekanan perlu dipelajari.

f) Durasi

Semakin lama durasi injeksi, *grouting* menyebar semakin jauh sehingga akan membentuk kolom *grouting* yang semakin besar. Namun demikian, semakin lama kecepatan sebaran *grouting* akan mengalami penurunan.

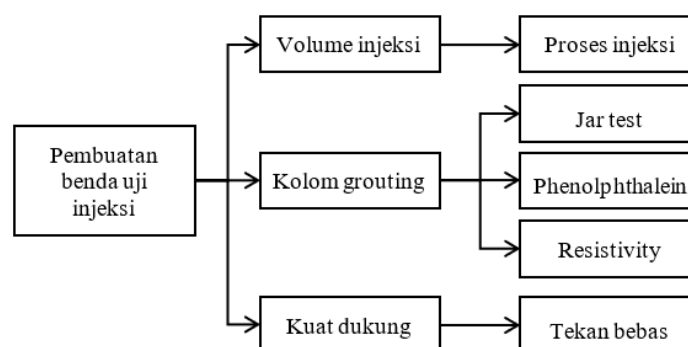
g) Radius lubang injeksi

Semakin besar radius lubang injeksi (lubang bor) berarti luas dinding lubang injeksi semakin besar sehingga *grouting* lebih mudah menyebar.

Ikatan antar fragmen terbentuk oleh *grouting* yang berhasil diinjeksikan sehingga membentuk kolom *grouting*. Ukuran kolom *grouting* dipengaruhi oleh volume injeksi *grouting*, sehingga pengaruh volume injeksi terhadap ukuran kolom *grouting* perlu dipelajari. Selanjutnya, ukuran kolom *grouting* akan mempengaruhi kuat dukung yang dihasilkan. Selain itu kuat dukung awal dan jenis bahan *grouting* berpotensi mempengaruhi kuat dukung sehingga perlu dipelajari pengaruhnya.

2.2.2. Konsep Penelitian

Penelitian dilakukan untuk mengukur indikator keberhasilan injeksi *grouting* yang meliputi volume injeksi, radius kolom *grouting*, dan kuat dukung, dengan konsep penelitian dan pengujian disajikan pada Gambar 2.33. Pengujian volume injeksi dilakukan berdasarkan data pada proses injeksi, sehingga tidak memerlukan benda uji tersendiri. Pengujian radius kolom *grouting* dilakukan untuk mendapatkan radius kolom *grouting* yang bagian *clay shale* yang tersementasi, dengan metode *jar test*, *phenolphthalein* dan *resistivity*. Metode *jar test* dan *phenolphthalein* merupakan metode *destructive*, sedangkan metode *resistivity* merupakan metode *non-destructive*. Pengujian kuat dukung dilakukan dengan uji tekan bebas, dan ini juga termasuk pengujian destruktif yang memerlukan benda uji tersendiri.



Gambar 2.33 Konsep penelitian dan pengujian.

Penelitian dilakukan untuk mempelajari variabel yang berpengaruh terhadap keberhasilan injeksi. Untuk maksud tersebut, penelitian dilakukan dengan membuat benda uji injeksi *grouting* dengan variasi variabel bebas yang meliputi porositas, kepadatan, kadar air, jenis *grouting*, rasio campuran *grouting*, tekanan dan durasi injeksi.

2.2.3. Konsep Analisis Data

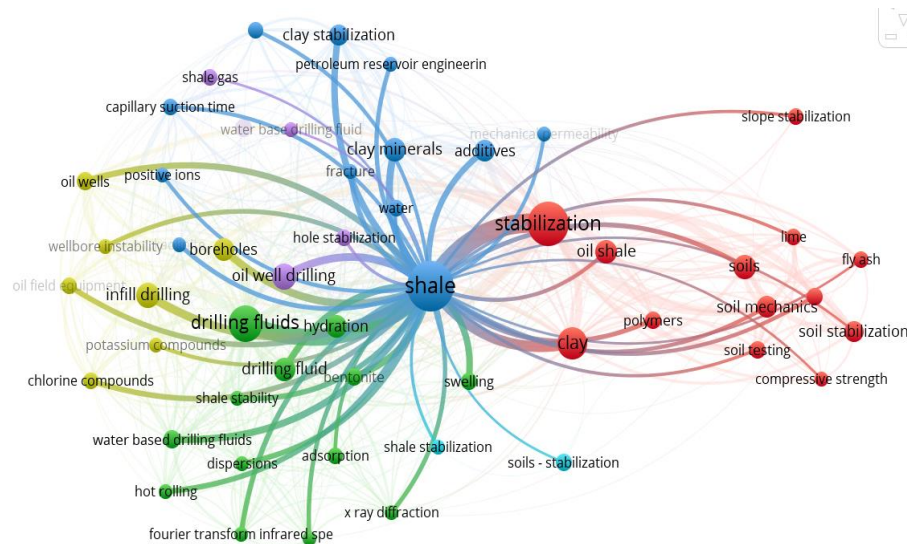
Analisis pengaruh dilakukan untuk mempelajari pengaruh setiap variabel bebas yang meliputi porositas, kepadatan, kadar air, perbandingan campuran, tekanan, dan durasi injeksi terhadap indikator injeksi. Keberhasilan injeksi diamati berdasarkan tiga indikator, yaitu volume injeksi, radius kolom *grouting* dan kuat dukung. Metode analisis pengaruh variabel bebas terhadap indikator keberhasilan dilakukan dengan analisis korelasi. Analisis ini dipilih karena dapat dilakukan dengan mudah dan cepat, baik untuk masing-masing variabel maupun secara bersama-sama (simultan). Namun demikian metode ini memiliki kelemahan karena tidak dapat diamati pola hubungannya. Selain menggunakan nilai korelasi, analisis dilakukan dengan mengamati grafik hubungan antara variabel bebas dan indikator injeksi.

Analisis perbandingan dilakukan untuk membandingkan efektifitas bahan *grouting*, yang dalam penelitian ini adalah pasta semen dan *geopolymer*. Analisis perbandingan jenis bahan injeksi ini dilakukan berdasarkan tiga indikator, yaitu volume injeksi, radius kolom *grouting* dan kuat dukung. Analisis perbandingan kuat dukung terhadap metode stabilisasi dilakukan dengan membandingkan kuat dukung injeksi dengan benda uji normal (non injeksi), dan benda uji stabilisasi dengan metode *mixing*. Analisis perbandingan metode digunakan untuk mendapatkan nilai efektivitas metode injeksi dibandingkan dengan non injeksi dan metode *mixing*.

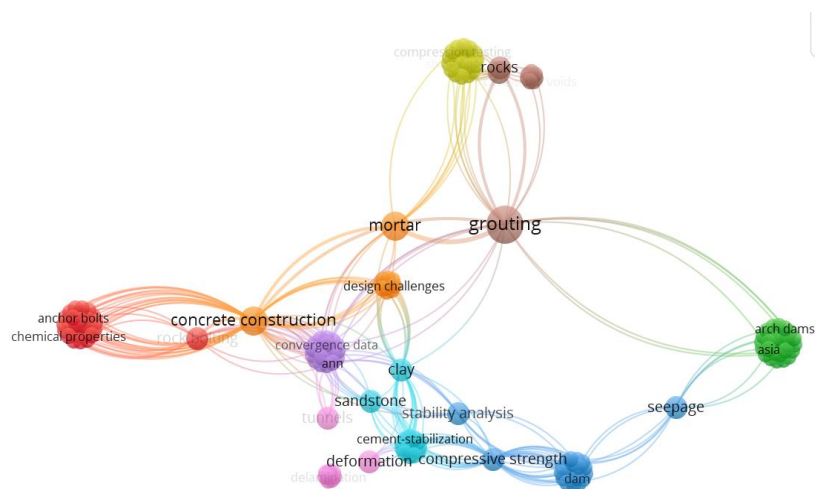
2.3. Kebaharuan (Noveltis)

Penelusuran data penelitian sebelumnya dilakukan dengan dua metode, yaitu menggunakan data base Scopus dan metode kedua dengan langsung membaca artikel ilmiahnya. Metode pertama dilakukan secara kualitatif, yaitu membuat peta hubungan antar topik penelitian dengan menggunakan software VOS-Viewer. Metode pertama ini tidak mendalam tetapi cepat untuk mendapatkan informasi tentang penelitian sebelumnya. Hasil pemetaan data Scopus adalah sebagai berikut:

- a) Penelusuran data Scopus dengan kata kunci *clay shale stabilization* yang disajikan pada Gambar 2.34 menunjukkan bahwa penelitian yang berkaitan dengan stabilisasi *clay shale* sudah ada.
- b) Penelusuran data Scopus dengan kata kunci *clay shale grouting* yang disajikan pada Gambar 2.35 menunjukkan indikasi bahwa topik *grouting* pada *clay shale* belum banyak diteliti.



Gambar 2.34 Peta data Scopus dengan kata kunci *clay shale stabilization* per tanggal 12 Desember 2021.



Gambar 2.35 Peta data Scopus dengan kata kunci *clay shale grouting* per tanggal 12 Desember 2021.

Berdasarkan gambaran dari data Scopus (Gambar 2.34 dan Gambar 2.35) menunjukkan bahwa topik penelitian stabilisasi *clay shale* dengan menggunakan metode injeksi dengan bahan stabilisasi semen dan *geopolymer* tidak didapatkan sehingga berpeluang besar untuk diteliti. Penelusuran dilanjutkan dengan membaca artikel-artikel ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Hasil kajian dikelompokkan dalam dua topik yaitu *clay shale* dan *grouting*.

Penelusuran penelitian-penelitian yang berkaitan dengan injeksi pada *clay shale* disajikan pada Tabel 2.6. Hasil penelusuran menunjukkan bahwa permasalahan durabilitas, degradasi dan penurunan kuat telah banyak dilakukan. Kajian tentang stabilisasi *clay shale* sudah mulai dikembangkan, dengan bahan stabilisasi berupa semen, kapur dan RHA. Stabilisasi dengan menggunakan bahan *geopolymer* sejauh ini belum pernah dilakukan. Penelitian tentang metode injeksi (*grouting*) telah banyak dilakukan untuk tanah granular (pasir dan kerikil) dan lempung, namun sejauh ini penelitian tentang injeksi pada *clay shale* belum didapatkan. Kajian tentang bahan injeksi (*grout*) telah banyak dilakukan, namun penerapan pada *clay shale* belum didapatkan.

Berdasarkan hasil penelusuran yang telah dilakukan, kajian tentang perbaikan tanah *clay shale* dengan metode injeksi semen dan *geopolymer* belum pernah dilakukan, sehingga berpotensi menghasilkan kebaruan, antara lain:

- a) Metode injeksi untuk perbaikan *clay shale* yang terdegradasi.
- b) Bahan *grouting* yang cocok untuk injeksi *clay shale*.
- c) Penggunaan *phenolphthalein* dan metode *resistivity* untuk deteksi kolom *grouting*.
- d) Variabel-variabel yang berpengaruh terhadap radius kolom *grouting* pada injeksi *clay shale*.
- e) Variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kuat dukung pada injeksi *clay shale*.

Tabel 2.6 Matrik posisi penelitian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya

Tahun	Peneliti	Clay shale								Grouting										
		Masalah		Stabilisasi (<i>mixing</i>)						Bahan			Metode			Tanah				
		Durabilitas	Strength	Semen	Kapur	RHA	Silica sol	Laterit glycol	Geopolymer	Semen	Silica sol	Geopolymer	Jet grouting	Fractured grouting	Permeation Grouting	Kerikil	Pasir	Lempung	Gambut	Clay shale
1991	Stark		√																	
1992	Dick	√																		
1998	Santi	√																		
2002	Markou											√								
2003	Agustawijaya	√																		
2004	Dano														√		√			
	Soga													√				√		
2007	Irsyam		√																	
2008	Ping									√					√	√				
2009	Ergular		√																	
	Erguler	√																		
2010	Dong	√																		
2011	Cristelo											√	√					√		
	Huat									√									√	
	Kazemian									√									√	
	Mohamad	√																		
	Wardani																			
2012	Bryson	√																		

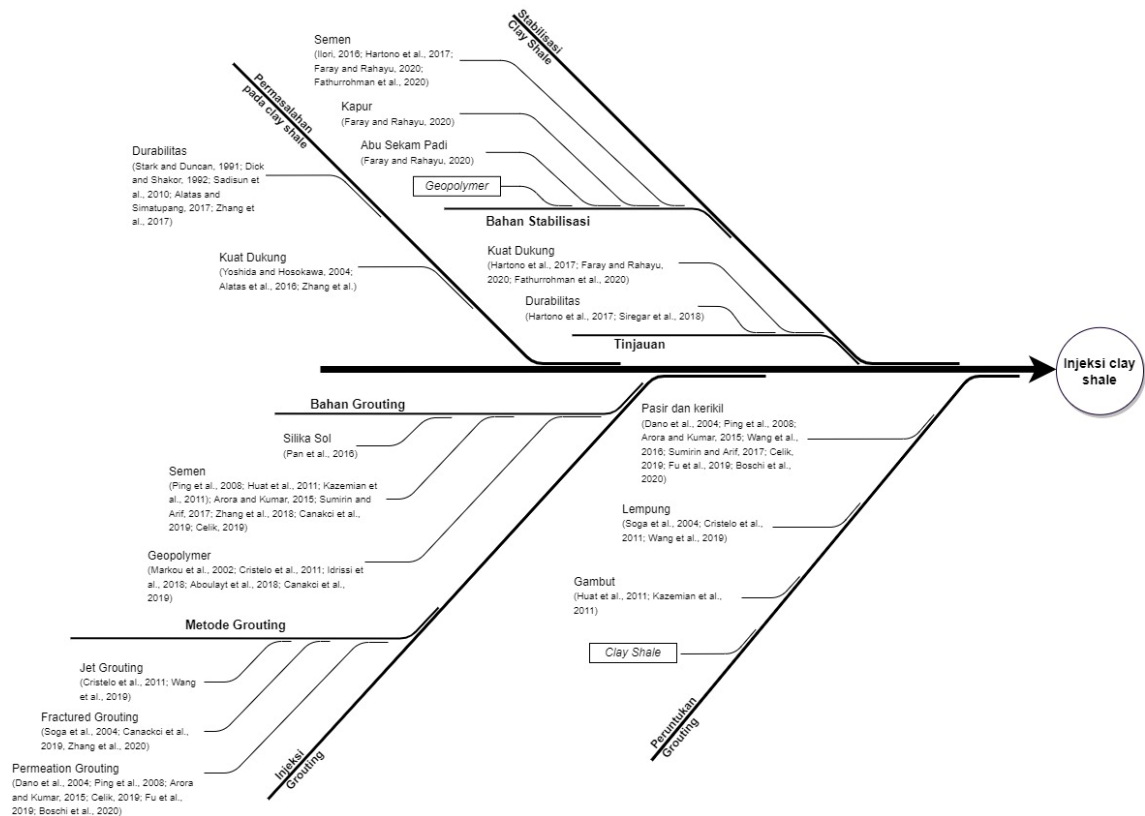
Tabel 2.6 Matrik posisi penelitian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Clay shale								Grouting										
		Masalah		Stabilisasi (<i>mixing</i>)						Bahan			Metode			Tanah				
		Durabilitas	Strength	Semen	Kapur	RHA	Silica sol	Laterit glycol	Geopolymer	Semen	Silica sol	Geopolymer	Jet grouting	Fractured grouting	Permeation Grouting	Kerikil	Pasir	Lempung	Gambut	Clay shale
2013	Gautam	√																		
2014	Alhadar		√																	
2015	Alatas	√																		
	Ariesnawan	√																		
	Arora									√					√		√			
	Shakoor	√																		
2016	Alatas	√																		
	Ankara	√																		
	Gautam	√																		
	Idrissi											√								
	Ilori			√																
	Pan						√				√									
	Wang																√			
	Zhang		√																	
2017	Alatas	√	√																	
	Gautam	√																		
	Hartono			√																

Tabel 2.6 Matrik posisi penelitian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya (lanjutan)

Tahun	Peneliti	Clay shale								Grouting										
		Masalah		Stabilisasi (<i>mixing</i>)						Bahan			Metode			Tanah				
		Durabilitas	Strength	Semen	Kapur	RHA	Silica sol	Laterit glycol	Geopolymer	Semen	Silica sol	Geopolymer	Jet grouting	Fractured grouting	Permeation Grouting	Kerikil	Pasir	Lempung	Gambut	Clay shale
	Rodvinij		√																	
	Sumirin									√							√			
2017	Yusuf		√																	
2018	Aboulayt											√								
	Mang	√																		
	Oktaviani	√																		
	Zhang									√										
2019	Boschi														√		√			
	Canakci									√		√								
	Celik									√					√		√			
	Djaha																			
	Fu														√		√			
	Wang												√					√		
2020	Faray			√	√	√														
	Fathurrohman			√																
	Rahayu							√												
	Kanji		√																	
2021	Sumiyanto			√					√	√		√								√

Road map penelitian injeksi *grouting* pada *clay shale* berdasarkan kajian pustaka disajikan pada Gambar 2.36. Topik-topik penelitian dan menjadi bagian *road map* penelitian adalah permasalahan pada *clay shale*, stabilisasi pada *clay shale*, injeksi *grouting* dan peruntukan metode injeksi *grouting*. Sejauh kajian pustaka yang didapatkan, injeksi *grouting* pada *clay shale* belum pernah diteliti.



Gambar 2.36 Road map penelitian perbaikan tanah *clay shale* dengan metode injeksi.

Penelitian tentang permasalahan pada *clay shale* dan batuan lempung telah banyak dikaji, namun sejauh literatur yang didapatkan penelitian yang membahas injeksi *grouting* pada *clay shale* belum didapatkan. Beberapa penelitian yang membahas permasalahan pada *clay shale* dan merupakan rujukan untuk penelitian ini antara lain:

- 1) Penelitian tentang stabilitas lereng pada tanah *clay shale* proyek Tol Semarang-Solo Paket VI Sta. 22+700 sampai Sta. 22+775 (Alhadar et al., 2014). Lokasi penelitian merupakan lereng yang rawan longsor sehingga perlu dilakukan kajian stabilitas lerengnya. Analisis dilakukan dengan menggunakan Metode Coloumb menggunakan Software Plaxis. Hasil analisis dengan parameter kuat geser pada

kondisi *fully degraded* menunjukkan angka aman kurang dari 1, yang berarti lereng tidak aman. Hasil penelitian ini menunjukkan, meskipun pada kondisi awal lereng pada kondisi stabil, namun ketika terdegradasi akan menjadi tidak stabil.

- 2) Penelitian tentang pengaruh properti batuan lempung terhadap perilaku disintegrasi (Shakoor and Gautam, 2015). Penelitian dilakukan dengan mempelajari faktor-faktor yang berpengaruh pada pelapukan batuan lempung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor-faktor pelapukan dapat dikelompokkan dalam dua jenis, yaitu jangka pendek (1 bulan) dan jangka panjang (6-12 bulan). Faktor-faktor pelapukan jangka pendek adalah kadar lempung, kadar mineral lempung ekspansif, absorpsi, kepadatan, porositas, dan Id_2 . Sedangkan untuk jangka panjang absorpsi dan kadar mineral lempung ekspansif.
- 3) Penelitian pengaruh cuaca terhadap disintegration dan kuat geser pada *clay shale* (Alatas et al., 2016). Pengujian pelapukan dilakukan pada *clay shale* dari Bawen-Semarang dan Hambalang dengan siklus basah kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *clay shale* dari Bawen memiliki durabilitas yang lebih rendah dari pada Hambalang, hal ini akibat fraksi halusnya *clay shale* dari Bawen (99,08%), lebih tinggi dari pada Hambalang (67,02%). Proses pengeringan dapat menyebabkan terjadinya disintegrasi, namun proses pembasahan-pengeringan lebih besar pengaruhnya dari pada proses pengeringan saja. Hasil penelitian ini memberikan informasi bahwa kadar fraksi halus merupakan faktor penting pada degradasi *clay shale*.
- 4) Penelitian pengaruh hujan terhadap kuat dukung *mudstone* (Zhang et al., 2016). Penelitian dilakukan pada lereng *mudstone* yang terjadi longsor setelah hujan di China Barat tahun 2011. Penelitian di laboratorium dilakukan untuk mempelajari pengaruh perendaman terhadap kuat geser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *mudstone* mengalami penurunan kuat geser 61,3% (sudut gesek internal) dan 63,3% untuk kohesi setelah perendaman 10 hari. Secara mikrostruktur perendaman menyebabkan meningkatnya porositas.
- 5) Penelitian pengaruh pelepasan tegangan terhadap degradasi pada *clay shale* (Alatas et al., 2017). Penelitian dilakukan untuk mempelajari pengaruh pelepasan tekanan terdapat degradasi pada *clay shale*. Pengujian triaxial dengan metode

multi-stage dilakukan untuk mengamati tegangan residunya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelepasan tegangan akan menurunkan tegangan residu. Hasil penelitian ini memberikan informasi pentingnya mempertimbangkan faktor berkurangnya tekanan *overburden* akibat galian terhadap meningkatkan risiko terjadinya degradasi.

- 6) Penelitian perilaku pengembangan dan durabilitas *clay shale* (Yusuf et al., 2017). Penelitian dilakukan pada *clay shale* dari Banyumeneng, Penawangan, dan Wonorejo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun pengembangan *clay shale* yang diuji tidak besar, namun durabilitasnya rendah. Hasil ini memberikan informasi meskipun sifat pengembangannya rendah, *clay shale* tetap harus diperhatikan masalah durabilitasnya.

Beberapa penelitian tersebut membahas tentang permasalahan durabilitas dan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap proses degradasi pada *clay shale*. Degradasi pada *clay shale* akan menyebabkan penurunan kuat dukung yang besar di kemudian hari, sehingga perlu dicarikan solusinya.

Meskipun penelitian injeksi *grouting* pada *clay shale* belum didapatkan, namun penelitian stabilisasi *clay shale* dengan metode telah dilakukan. Beberapa penelitian tersebut adalah:

- 1) Penelitian tentang stabilisasi *clay shale* dan *marl* untuk bahan subgrade (Ilori, 2016). Penelitian dilakukan dengan mencampurkan bahan stabilisasi berupa semen pada *clay shale* maupun *marl*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semen dapat digunakan untuk bahan stabilisasi *clay shale* maupun *marl*. Untuk mencapai kuat dukung UCS sebesar 1,5 MPa, kadar semen yang dibutuhkan berbeda-beda untuk setiap jenis *clay shale* yaitu antara 7-12%, sedangkan untuk *marl* hanya sekitar 3%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *clay shale* dapat dilakukan perbaikan, dan semen merupakan bahan yang cocok sebagai bahan stabilisasi.
- 2) Penelitian stabilisasi *clay shale* menggunakan semen (Hartono et al., 2018). Penelitian dilakukan di laboratorium dengan mencampurkan *clay shale* dengan semen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilisasi pada *clay shale* dapat meningkatkan kuat dukungnya. Penelitian ini menguatkan penelitian sebelumnya (Ilori, 2016), bahwa semen merupakan bahan yang dapat digunakan untuk stabilisasi *clay shale*.

- 3) Penelitian stabilisasi *clay shale* dengan variasi jenis material stabilisasi (Faray and Rahayu, 2020). Penelitian dilakukan dengan membandingkan kuat dukung *clay shale* yang distabilisasi dengan bahan semen, RHA, dan kapur. Hasil penelitian menunjukkan semen merupakan bahan stabilisasi paling cocok untuk meningkatkan kuat dukung *clay shale*. Sedangkan RHA dan kapur tidak berhasil meningkatkan kuat dukungnya. Hasil penelitian ini menguatkan penelitian sebelumnya tentang keberhasilan semen untuk stabilisasi *clay shale*. Selain itu penelitian ini memberikan informasi bahwa RHA dan kapur tidak cocok untuk *clay shale*.

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut *clay shale* dapat dilakukan stabilisasi dengan semen. Hal ini menunjukkan bahwa semen dapat membentuk ikatan antar fragmen *clay shale*.

Penelitian injeksi *grouting* pada *clay shale* belum didapatkan. Namun beberapa penelitian metode injeksi *grouting* telah dilakukan terutama untuk tanah pasir. Beberapa penelitian tersebut adalah:

- 1) Penelitian injeksi *grouting* pada tanah lempung (Soga et al., 2004). Penelitian dilakukan di laboratorium dengan melakukan injeksi pada tanah lempung dengan benda uji ukuran diameter 5 cm tinggi 10 cm. Bahan yang digunakan untuk *grouting* adalah semen-bentonit dengan rasio air semen sebesar 3. Tekanan injeksi yang diberikan bervariasi antara 140 - 14000 kPa. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya *fracture* pada tekanan yang tinggi. Hasil penelitian ini memberikan gambaran bahwa *permeation grouting* sulit terjadi pada tanah lempung, dan *grouting* yang terjadi adalah *fractured grouting*.
- 2) Penelitian kuat dukung pasir yang diinjeksi *grouting* (Dano et al., 2004). Penelitian dilakukan di laboratorium untuk mempelajari pengaruh *grouting* semen pada tanah pasir terhadap nilai kuat dukungnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat dukung benda uji dipengaruhi oleh kepadatan tanah pasir dan rasio air semen dari *grouting*. Pada penelitian ini seluruh benda uji terjangkau *grouting*, sehingga tidak memperhitungkan radius kolom *grouting*.
- 3) Penelitian injeksi *grouting* pada tanah pasir campur kerikil (Ping et al., 2008). Penelitian dilakukan di laboratorium pada kotak uji 1,670 mm×1,230 mm×1,023 mm, dengan bahan *grouting* adalah pasta semen. Penelitian berhasil

mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh pada injeksi *grouting*, yaitu: porositas, permeabilitas, tekanan, durasi, dan rasio air semen. Penelitian ini menunjukkan bahwa pasta semen dapat digunakan untuk injeksi tanah pasir.

- 4) Penelitian *grouting* di bawah lapis perkerasan (Ni and Cheng, 2012). Penelitian dilakukan di Magong Airport, Penghu. Penelitian dilakukan dengan melakukan injeksi *grouting* dengan membuat lubang injeksi dari permukaan perkerasan sampai menembus lapisan tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode injeksi *grouting* dapat digunakan untuk perbaikan tanah di bawah lapis perkerasan tanpa harus melakukan pembongkaran.
- 5) Penelitian injeksi *grouting* pada *mudstone* dengan *silika sol* (Pan et al., 2016). Penelitian dilakukan dengan menginjeksikan *silika sol* pada *mudstone* dengan tekanan 2,5 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *silika sol* tidak dapat digunakan untuk bahan *grouting* pada *mudstone* karena sifat *silika sol* yang cepat mengeras. Hasil penelitian ini memberikan rujukan bahwa bahan *grouting* yang digunakan tidak boleh cepat mengeras.
- 6) Penelitian injeksi *grouting* pada tanah pasir (Wang et al., 2016). Penelitian dilakukan di laboratorium dengan melakukan injeksi pasta semen pada tanah pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio air semen, tekanan, dan derajat kejenuhan berpengaruh dalam injeksi pasta semen, namun rasio air semen merupakan variabel yang paling berpengaruh. Pada penelitian ini, indikator keberhasilan injeksi yang digunakan adalah volume pasir yang tersementasi (kolom *grouting*). Metode kolom *grouting* ini digunakan sebagai rujukan untuk injeksi *grouting*.
- 7) Penelitian injeksi *grouting* pada granit yang telah mengalami degradasi (Zhang et al., 2020). Penelitian injeksi *grouting* dilakukan pada granit yang telah mengalami pelapukan sehingga teksturnya seperti tanah granular dan terdapat pori antar fragmen (*inter pores*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *permeation grouting* terjadi pada $D_{10} > 0,092 \text{ mm}$. Sedangkan untuk $D_{10} < 0,092 \text{ mm}$ akan membentuk pola *compaction* atau *fractured grouting*. Untuk $D_{10} < 0,092 \text{ mm}$, dengan $D_{60} > 0,37 \text{ mm}$ terbentuk *compaction grouting*, untuk $D_{60} < 0,31 \text{ mm}$ terjadi *fractured grouting*, dan untuk $0,37 < D_{60} < 0,31$ terjadi kombinasi antara

compaction dan *fractured grouting*. Hasil penelitian ini memberikan peluang injeksi pada batuan yang telah mengalami degradasi.

Selain menggunakan semen, beberapa penelitian stabilisasi tanah juga menggunakan *geopolymer* dan menunjukkan keberhasilan. Hal ini menunjukkan *geopolymer* mempunyai daya ikat yang baik sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan *grouting*. Beberapa penelitian tersebut antara lain:

- 1) Penelitian stabilisasi tanah lempung dengan menggunakan *geopolymer* dan semen (Arulrajah et al., 2018). Penelitian dilakukan dengan melakukan stabilisasi tanah lempung dengan bahan stabilisasi semen dan *geopolymer*. *Geopolymer* yang digunakan merupakan campuran *fly ash* dan *slag*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semen dan *geopolymer* dapat digunakan untuk stabilisasi tanah lempung. Berdasarkan kuat dukung yang dihasilkan, stabilisasi dengan kadar 10%, semen lebih baik dari pada *geopolymer*, sedangkan pada kadar 20% *geopolymer* yang lebih baik. Hasil penelitian ini memberikan peluang pemanfaatan *geopolymer* untuk stabilisasi maupun injeksi *clay shale*.
- 2) Penelitian penggunaan *geopolymer* untuk stabilisasi tanah lunak (Cristelo et al., 2011). Penelitian dilakukan dengan menggunakan *jet grouting* dengan *geopolymer* berbasis *fly ash*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kadar *fly ash* kuat dukung yang dihasilkan semakin tinggi. Penelitian ini merupakan rujukan dimana *geopolymer* berpotensi digunakan sebagai bahan *grouting*. Keberhasilan *geopolymer* pada metode *jet grouting* ini menunjukkan bahwa *geopolymer* dapat digunakan untuk bahan injeksi.
- 3) Penelitian stabilisasi tanah menggunakan semen dan *geopolymer* (Cristelo et al., 2013). Penelitian stabilisasi dilakukan dengan membandingkan kuat dukung benda uji yang distabilisasi semen dan *geopolymer*. Hasil penelitian menunjukkan pada umur kurang 101 hari, stabilisasi semen lebih tinggi daripada *geopolymer*. Sedangkan pada umur 365 hari kuat dukung hasil stabilisasi *geopolymer* lebih tinggi dari semen. Hasil penelitian ini memberikan informasi adanya perbedaan perilaku pada stabilisasi semen dan *geopolymer*, dimana peningkatan kekuatan stabilisasi *geopolymer* lebih lambat namun menghasilkan kuat dukung yang lebih tinggi.

- 4) Stabilisasi tanah lempung dengan *geopolymer* dan semen (Ghadir and Ranjbar, 2018). Penelitian stabilisasi tanah lempung menggunakan semen dan *geopolymer* dengan bahan abu vulkanik. Penelitian dilakukan pada variasi kadar air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semen lebih efektif digunakan pada tanah lempung dengan kadar air pada OMC, sedangkan *geopolymer* lebih efektif pada kondisi kering. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya bahwa *geopolymer* cocok untuk stabilisasi tanah lempung, meskipun bahan binder yang digunakan berbeda dengan semen.

2.4. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian pustaka dan alur pikir yang dikembangkan beberapa variabel dapat diduga pengaruhnya. Beberapa dugaan (hipotesis) dapat dirumuskan adalah:

- a) Semakin besar porositas, maka volume injeksi akan semakin besar. Namun karena kepadatannya semakin rendah kuat dukungnya menurun. Berdasarkan kedua hal tersebut diduga ada nilai optimum dari porositas terhadap kuat dukung yang dihasilkan.
- b) Diduga terdapat nilai optimum dari rasio air-semen pada semen dan rasio aktivator-*fly ash* pada *geopolymer*. Hal ini karena semakin besar kadar *binder*, ikatan yang dihasilkan akan semakin tinggi, tetapi viskositasnya menurun sehingga akan menyulitkan proses injeksi.
- c) Semakin besar tekanan, volume injeksi semakin besar dan kuat tekan yang dihasilkan juga semakin tinggi.
- d) Semakin lama durasi injeksi, volume injeksi semakin besar dan kekuatan juga semakin tinggi.