

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

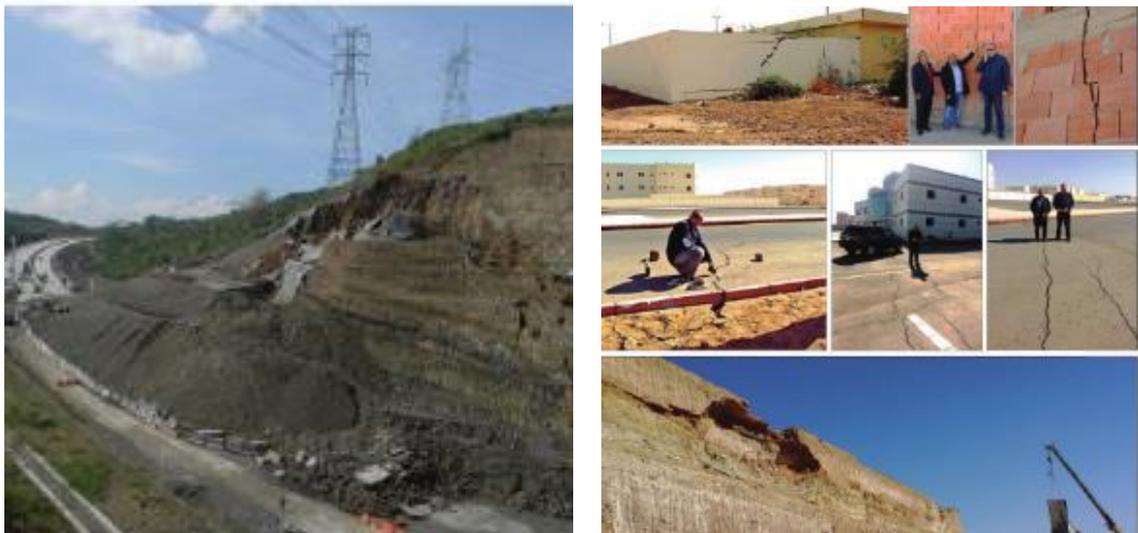
Clay shale merupakan batuan sedimen yang termasuk dalam kelompok *mud rock* (Dick and Shakoor, 1992) dan dapat digolongkan dalam batuan lempung (Picard, 1971; Gautam and Shakoor, 2013). Permasalahan yang sering terjadi pada *clay shale* dan batuan lempung pada umumnya adalah terjadinya degradasi akibat proses pelapukan, sehingga kuat dukungannya mengalami penurunan. Pada kondisi terbuka, *clay shale* yang terpapar oleh perubahan cuaca (siklus kering-basah) akan mengalami proses pelapukan. Panas dari sinar matahari menyebabkan *clay shale* menjadi kering dan muncul retakan-retakan rambut, kondisi ini merupakan proses awal terjadinya degradasi. Pada saat hujan, air diserap oleh *clay shale* dan dipercepat oleh keberadaan retakan-retakan awal tersebut. Keberadaan air ini menyebabkan menurunnya ikatan antar mineral lempung sehingga menyebabkan proses degradasi terjadi lebih cepat (Stark and Duncan, 1991; Sadisun et al., 2010; Dick and Shakoor, 1992; Gautam and Shakoor, 2013; Supandi et al., 2018).

Pada kondisi tidak terjadi pelapukan, kuat dukung *clay shale* relatif tinggi yaitu pada rentang 1-20 MPa (Amann et al., 2011; Berisavljević et al., 2018; Kanji and Leao, 2020) sehingga masuk dalam kelompok batuan sedimen. Secara alami batuan sedimen yang berada pada permukaan tanah akan mengalami proses pelapukan dari kondisi batuan menjadi tanah, dengan kedalaman pelapukan mencapai kurang lebih 4-5 m dari permukaan tanah (Wan et al., 2019). Akibat pelapukan ini, kuat dukungannya akan mengalami penurunan yang dapat mencapai lebih dari 60% (Zhang et al., 2016).

Pekerjaan galian atau pemotongan lereng pada formasi *clay shale* akan menyebabkan bagian yang semula tertutup menjadi terbuka sehingga *clay shale* akan mengalami proses pelapukan akibat terpapar perubahan cuaca. Selain itu, berkurangnya tekanan *overburden* akibat pekerjaan galian juga berpotensi meningkatkan risiko terjadinya degradasi (Alatas et al., 2017). Keberadaan beban siklik juga merupakan faktor yang berpengaruh terhadap degradasi (Stark and Duncan, 1991). Pembangunan jalan pada lereng dengan formasi *clay shale* akan risiko terjadinya degradasi, hal ini disebabkan oleh galian atau pemotongan lereng yang menyebabkan *clay shale* menjadi terbuka sehingga

terpapar perubahan cuaca (siklus kering-basah), pelepasan tegangan akibat pemotongan lereng, dan beban siklik dari kendaraan.

Proses pelapukan sampai munculnya permasalahan memerlukan waktu yang bervariasi antara 3-18 bulan (Adib, 2000; Irsyam et al., 2007; Berisavljević et al., 2018). Pada awal konstruksi kuat dukung *clay shale* masih tinggi, namun akibat proses pelapukan kuat dukungnya akan mengalami penurunan dan menimbulkan masalah dikemudian hari, antara lain longsor pada lereng, kerusakan badan jalan dan permasalahan pada bangunan lain di atasnya (Gambar 1.1). Beberapa masalah yang timbul akibat proses pelapukan batuan sedimen antara lain longsor pada bendungan Luis Dam di California pada tahun 1981 (Stark and Duncan, 1991), keruntuhan lereng setelah lima bulan di Martinez, Contra Costa, California (Adib, 2000), keruntuhan pada *embankment* pada Tol Cipularang KM 97+500 setelah 11 bulan operasi (Irsyam et al., 2007), longsor di Hambalang tahun 2012 (Alatas et al., 2015), longsor pada lereng Tol Bawen-Semarang pada tahun 2013 (Alatas et al., 2015), longsor di China Barat pada tahun 2011 (Zhang et al., 2016), dan permasalahan pada badan jalan maupun bangunan lainnya di kota Tabuk Saudi Arabia (Embaby et al., 2020).



(a)

(b)

Gambar 1.1 Permasalahan yang timbul akibat degradasi pada *clay shale*: (a) longsor pada lereng Toll Bawen-Semarang (Alatas et al., 2015), dan kerusakan bangunan, jalan dan lereng di kota Tabuk Saudi Arabia (Embaby et al., 2020).

1.1.1. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah dimaksudkan untuk memperbaiki sifat-sifat fisik dan mekanik tanah, salah satunya untuk meningkatkan kuat dukung (Ingles and Metcalf, 1972). Stabilisasi dengan mencampurkan (*mixing*) semen berhasil meningkatkan sifat fisik dan mekanik berbagai jenis tanah (Ingles and Metcalf, 1972; Horpibulsuk et al., 2010; Cristelo et al., 2013; Ghadir and Ranjbar, 2018; Hartono et al., 2018; Siregar et al., 2018). Pada *clay shale* yang terdegradasi, penelitian stabilisasi dengan semen juga menunjukkan keberhasilan (Ilori, 2016; Hartono et al., 2017; Faray and Rahayu, 2020; Fathurrohman et al., 2020). Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, metode stabilisasi dengan mencampurkan semen menunjukkan keberhasilan pada berbagai jenis tanah termasuk pada *clay shale* yang terdegradasi.

Pada awalnya kuat dukung *clay shale* cukup tinggi sehingga tidak muncul masalah, namun proses pelapukan akan menyebabkan permasalahan di kemudian hari. Proses pelapukan ini dapat berlangsung cukup lama (Adib, 2000; Irsyam et al., 2007; Berisavljević et al., 2018), sehingga permasalahan akibat degradasi baru muncul setelah konstruksi selesai. Pada kondisi ini stabilisasi dengan metode *mixing* akan mengalami kesulitan dalam pelaksanaannya. Selain itu, stabilisasi dengan metode *mixing* juga kesulitan untuk diterapkan sampai kedalaman pelapukan yang dapat mencapai 4-5 m (Wan et al., 2019).

1.1.2. Injeksi Grouting

Metode *mixing* lebih cocok digunakan tanah timbunan atau tanah bagian permukaan. Untuk bagian yang lebih dalam, lebih cocok digunakan metode injeksi *grouting*. Pada metode injeksi, bahan *grouting* dalam bentuk suspensi atau likuid dimasukkan kedalam pori-pori tanah dengan memberikan tekanan (Cambefort, 1977; Raju and Valluri, 2008). Metode injeksi *grouting* ini telah banyak digunakan untuk perbaikan tanah pasir, antara lain perbaikan tanah pasir untuk mengurangi risiko likuifaksi di Karatsu Jepang (Hashimoto et al., 2016), perbaikan tanah dasar di bawah perkerasan bandara (Ni and Cheng, 2012; Takano et al., 2016; Guo et al., 2020), dan perbaikan tanah dasar pada jalan raya (Zhou et al., 2018).

Secara umum injeksi *grouting* memungkinkan diaplikasikan (*groutable*) pada tanah pada rentang gradasi butiran pasir (Karol, 2003), dan dapat ditentukan berdasarkan

rentang d_{50} yaitu antara 0,1-2 mm (Vipulanandan and Ozgurel, 2009). Berdasarkan rujukan injeksi pada tanah pasir (granular), faktor-faktor utama yang berpengaruh terhadap keberhasilan injeksi *grouting* antara lain porositas tanah, viskositas *grouting*, tekanan dan durasi injeksi (Perret et al., 2000; Ping et al., 2008; Wang et al., 2016; Hou et al., 2019). Pada pengujian di laboratorium, metode injeksi berhasil diterapkan pada tanah granular baik pasir maupun kerikil (Dano et al., 2004; Ping et al., 2008; Arora and Kumar, 2015; Wang et al., 2016; Celik, 2019; Djaha et al., 2019; Boschi et al., 2020). Kelebihan dari metode injeksi adalah dapat diterapkan untuk perbaikan tanah dasar di bawah lapis perkerasan tanpa melakukan pembongkaran (Ni and Cheng, 2012; Guo et al., 2020), sehingga metode injeksi ini dapat dikategorikan metode perbaikan tanah non destruktif.

Pada kondisi tidak terdegradasi, porositas *clay shale* sangat rendah yaitu kurang dari 20% (Amann et al., 2011; Kanji and Leao, 2020), sehingga sulit dilakukan injeksi *grouting*. Namun demikian, *clay shale* pada kondisi ini belum/tidak memerlukan stabilisasi karena kuat dukungannya masih tinggi. Pada kondisi terdegradasi, porositas *clay shale* meningkat sampai dengan 54% (Singh et al., 1987). Peningkatan porositas ini akibat munculnya pori-pori diantara fragmen-fragmen, sehingga pada kondisi terdegradasi ini terdapat dua jenis pori-pori yaitu intra fragmen dan inter fragmen (Li and Zhang, 2009). Pori-pori inter fragmen merupakan pori-pori diantara fragmen-fragmen yang muncul akibat terjadinya degradasi. *Clay shale* yang terdegradasi ini akan berbentuk fragmen-fragmen sehingga menyerupai tanah granular sehingga secara gradasi masuk dalam zona *groutable*. Pori-pori diantara fragmen-fragmen ini saling terhubung sehingga mempunyai peluang untuk dilakukan injeksi *grouting*. Oleh karena itu, timbul gagasan injeksi *grouting* pada *clay shale* yang telah terdegradasi. Namun demikian berdasarkan referensi yang didapatkan injeksi *grouting* pada *clay shale* yang terdegradasi belum didapatkan, dan sejauh ini injeksi *grouting* lebih banyak diaplikasikan pada tanah granular. Berdasarkan pertimbangan tersebut perlu dilakukan penelitian injeksi *grouting* untuk perbaikan *clay shale* yang terdegradasi.

1.1.3. Bahan Grouting

Grouting yang digunakan untuk bahan injeksi harus memiliki viskositas yang rendah agar dapat mengalir dalam pori-pori tanah, memiliki waktu ikat lama sehingga mempunyai

kesempatan injeksi yang cukup, dan memiliki kemampuan mengikat butiran tanah. Pasta semen merupakan salah satu material yang telah banyak dikaji untuk bahan *grouting* (Huat et al., 2011; Kazemian et al., 2011; Arora and Kumar, 2015; Sumirin and Arief, 2017; Zhang et al., 2018; Canakci et al., 2019; Celik, 2019). Penggunaan pasta semen untuk bahan injeksi *grouting* memiliki beberapa kelebihan, yaitu ketersediaan di pasar cukup melimpah dengan harga yang relatif murah, dan secara teknis berhasil digunakan untuk injeksi tanah granular.

Geopolymer yang merupakan alternatif pengganti semen yang pada awalnya dikembangkan untuk pembuatan beton (Davidovits, 1994; Ekaputri and Triwulan, 2013; Hassan et al., 2019; Qomaruddin et al., 2019). *Geopolymer* dibuat dari campuran *binder* dan aktivator. *Binder* yang banyak dikembangkan merupakan limbah industri yang kaya *aluminosilicate*, antara lain, *fly ash* (FA), *ground granulated blast furnace slag* (GGBS), *mud*, *metakaolin*, and *rice husk ash* (Lin et al., 2009; Bakri et al., 2012; Ekaputri and Triwulan, 2013; Singhi et al., 2016; Mulyana et al., 2017; Hadi et al., 2018; Adam et al., 2019). Sedangkan aktivator merupakan larutan alkaline yang merupakan campuran antara NaOH atau KOH dengan Na_2SiO_3 (Thapa and Waldmann, 2018).

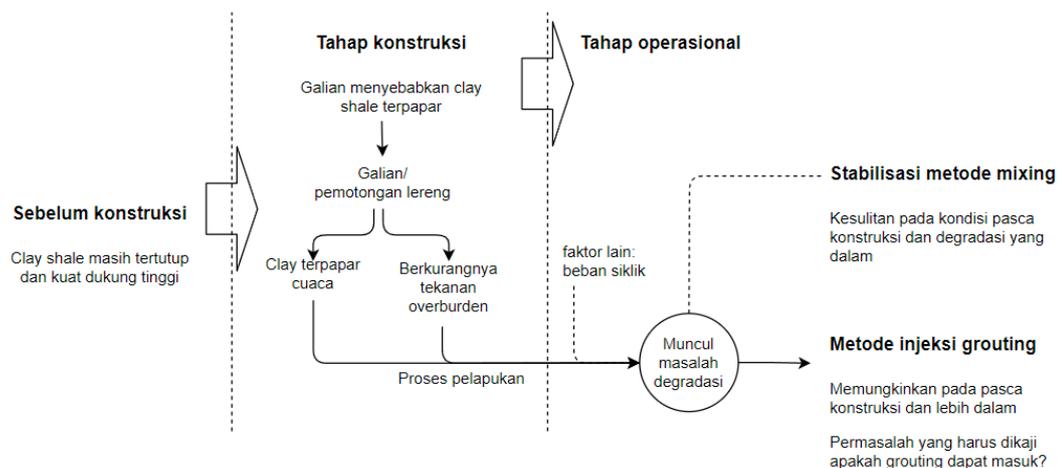
Pada perkembangannya, *geopolymer* dikembangkan untuk stabilisasi tanah (Cristelo et al., 2013; Arulrajah et al., 2018; Ghadir and Ranjbar, 2018; Arun et al., 2019; Canakci et al., 2019; Murmu et al., 2019; Wong et al., 2019), dan juga telah dikaji untuk digunakan sebagai bahan *grouting* (Cristelo et al., 2011; Aboulayt et al., 2018; Idrissi et al., 2018; Canakci et al., 2019). *Fly ash* merupakan salah satu material yang banyak dikembangkan untuk *geopolymer*. Produksi *fly ash* dari PLTU di Indonesia cukup tinggi yaitu lebih dari 5 juta ton per tahun dengan tingkat pemanfaatan masih rendah yaitu 10-12% (Ekaputri and Bari, 2020), sehingga peluang untuk memanfaatkan *fly ash* masih sangat tinggi. Upaya memanfaatkan *fly ash* ini akan memberikan dampak positif dalam pengembangan material bangunan maupun aspek lingkungan.

Proses injeksi memerlukan waktu cukup untuk mengalirkan bahan stabilisasi dalam pori-pori (Fu et al., 2019), sehingga waktu ikatan awal merupakan batasan dalam proses injeksi. Waktu ikatan awal *geopolymer* dengan *fly ash* rendah kalsium (tipe F) lebih lama dari pada pasta semen, hal ini merupakan salah satu kelebihan dari *geopolymer* (Qomaruddin et al., 2019; Ranjbar et al., 2020), namun dari perbandingan nilai viskositas, pasta semen lebih baik daripada *geopolymer* (Favier et al., 2014; Hamza et al., 2019).

Tujuan dari injeksi *grouting* adalah meningkatkan kuat dukung, sehingga kuat dukung merupakan indikator penting dalam injeksi. Secara umum semakin tinggi kadar *binder* (semen atau *fly ash*) kuat dukung yang dihasilkan semakin tinggi, namun viskositasnya semakin tinggi sehingga lebih sulit dalam proses injeksi (Wang et al., 2018; Djaha et al., 2019). Perilaku ini memerlukan kajian untuk mendapatkan kadar *binder* yang tepat sehingga menghasilkan kuat dukung terbaik.

1.2. Identifikasi Masalah

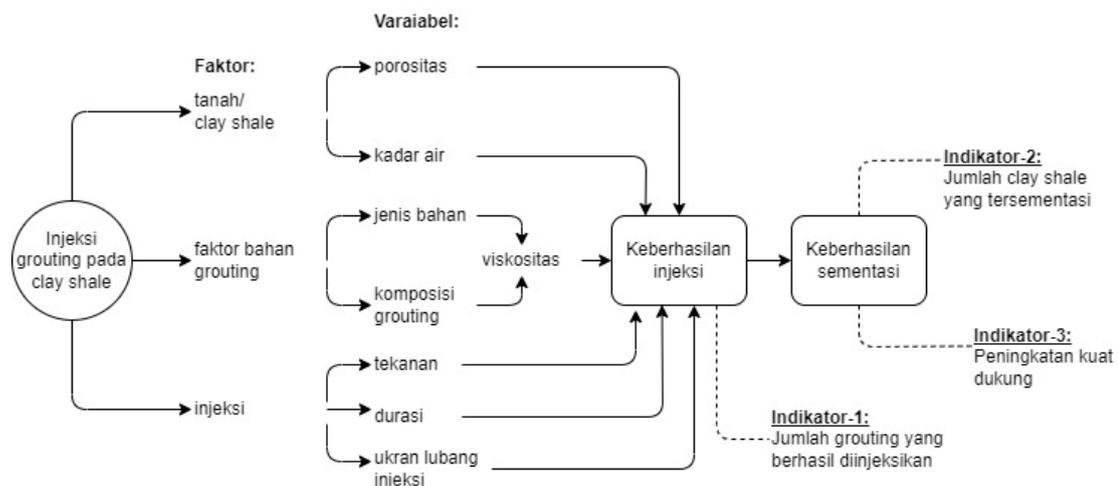
Jalan raya ataupun bangunan yang lain terkadang dibangun pada kawasan lereng yang terdapat formasi *clay shale*. Galian dan pemotongan lereng dapat menyebabkan formasi *clay shale* terbuka dan tekanan *overburden* berkurang. Hal ini akan menyebabkan terjadinya proses pelapukan sehingga berakibat terjadinya degradasi pada *clay shale*. Pada jalan raya, beban siklik kendaraan akan meningkatkan risiko terjadinya degradasi. Pada awalnya kuat dukung *clay shale* masih tinggi, namun proses pelapukan yang terjadi akan menyebabkan masalah di kemudian hari. Proses pelapukan ini dapat berlangsung lama (Berisavljević et al., 2018), sehingga permasalahan degradasi dapat muncul pada fase operasi (pasca konstruksi). Pada kondisi tersebut, perbaikan atau stabilisasi dengan metode *mixing* sulit dilakukan. Kesulitan ini masih ditambah dengan kedalaman degradasi yang dapat mencapai 4-5 meter tanah (Wan et al., 2019). Metode injeksi *grouting* diusulkan untuk mengatasi kesulitan pada metode *mixing*. Alur identifikasi masalah pada *clay shale* disajikan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Alur identifikasi masalah pada *clay shale*.

Keberhasilan metode injeksi dipengaruhi oleh keberhasilan bahan *grouting* mengisi pori-pori antar fragmen (keberhasilan proses injeksi) dan keberhasilan bahan *grouting* mengikat fragmen-fragmen *clay shale* (keberhasilan sementasi). Keberhasilan proses injeksi ini berkaitan dengan proses bahan *grouting* mengalir dan mengisi pori-pori antar fragmen. Keberhasilan injeksi ini dipengaruhi oleh porositas *clay shale*, kadar air *clay shale*, jenis material *grouting*, komposisi campuran *grouting*, viskositas bahan *grouting*, tekanan injeksi dan durasi injeksi. Selanjutnya setelah bahan *grouting* berhasil mengisi pori-pori, keberhasilan sementasi dipengaruhi oleh ikatan yang terbentuk antara fragmen-fragmen *clay shale* oleh bahan *grouting*. Keberhasilan sementasi ini dipengaruhi oleh jumlah bahan *grouting* yang berhasil diinjeksikan dan kemampuan material *grouting* membentuk ikatan. Identifikasi faktor dan variabel yang berpengaruh dalam stabilisasi dengan metode injeksi *grouting* disajikan pada

Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Identifikasi faktor-faktor dan variabel yang berpengaruh terhadap injeksi *grouting* pada *clay shale*.

1.2.1. Keberhasilan Proses Injeksi

Proses injeksi merupakan proses memasukkan bahan *grouting* ke dalam pori-pori antar fragmen dengan memberikan tekanan (Cambefort, 1977; Raju and Valluri, 2008). Keberhasilan proses injeksi ini ditentukan berdasarkan volume bahan *grouting* yang berhasil diinjeksikan, dan dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu: faktor tanah *clay shale*, faktor bahan *grouting*, dan faktor injeksi. Variabel pada faktor *clay shale* yang

berpengaruh adalah porositas dan kadar air. Variabel pada bahan stabilisasi adalah jenis bahan stabilisasi dan perbandingan campuran bahan stabilisasi. Sedangkan variabel pada proses injeksi adalah tekanan injeksi dan durasi injeksi. Identifikasi variabel-variabel yang berpengaruh pada proses injeksi adalah sebagai berikut ini.

a) Porositas *clay shale*.

Porositas *clay shale* berkaitan dengan volume pori dalam *clay shale*. Semakin besar volume pori, kesempatan bahan injeksi untuk mengisi pori-pori akan lebih besar. Degradasi pada *clay shale* menyebabkan terjadinya peningkatan porositasnya (Singh et al., 1987) akibat munculnya inter pori diantara fragmen-fragmen (Li and Zhang, 2009). Semakin besar porositas, bahan *grouting* akan semakin mudah mengalir untuk mengisi pori-pori dan jumlah bahan *grouting* yang berhasil diinjeksikan semakin besar (Ping et al., 2008; Hou et al., 2019).

b) Kadar air

Beberapa penelitian pada tanah pasir menunjukkan bahwa derajat kejenuhan berpengaruh terhadap keberhasilan injeksi (Perret et al., 2000; Wang et al., 2016). Variabel derajat kejenuhan ini berhubungan dengan kadar air dan porositas tanah. Semakin besar kadar air, derajat kejenuhan tanah semakin besar. Semakin besar kadar air, hambatan pada proses injeksi meningkat, hal ini karena bahan *grouting* lebih mudah mendorong udara dari pada mendorong air pori (Wang et al., 2016).

c) Jenis bahan *grouting*

Pengaruh jenis bahan *grouting* ini berkaitan dengan nilai viskositas. Pada komposisi campuran yang setara, beberapa penelitian menunjukkan bahwa viskositas *geopolymer* lebih tinggi dari pada pasta semen (Pan et al., 2016; Aboulayt et al., 2018; Behnood, 2018; Hamza et al., 2019). Perbedaan viskositas kedua bahan *grouting* ini dipengaruhi oleh jenis bahan pelarutnya, dimana pasta semen menggunakan air sedangkan *geopolymer* menggunakan aktivator (Struble and Sun, 1995; Favier et al., 2014).

d) Komposisi campuran bahan *grouting*

Pada proses injeksi, komposisi campuran bahan *grouting* mempengaruhi viskositasnya. Pasta semen dibuat dengan mencampurkan air dengan semen, sedangkan *geopolymer* merupakan campuran antara aktivator dan *fly ash*. Semakin besar rasio air semen (f_{PC}) atau rasio aktivator *fly ash* (f_{GP}) akan menghasilkan bahan

grouting dengan viskositas semakin rendah (Shahriar and Nehdi, 2012; Favier et al., 2014; Idrissi et al., 2018; Djaha et al., 2019; Hamza et al., 2019).

e) Tekanan injeksi

Semakin besar tekanan injeksi, jumlah bahan *grouting* yang berhasil diinjeksikan akan semakin besar dan sebaran injeksi akan semakin jauh (Ping et al., 2008; Fu et al., 2019).

f) Durasi injeksi

Pada prinsipnya semakin lama durasi injeksi, kesempatan bahan *grouting* mengalir dalam pori-pori tanah semakin besar sehingga jumlah bahan *grouting* semakin besar pula (Celik, 2019). Namun demikian proses injeksi akan berhenti setelah waktu tertentu (Fu et al., 2019). Selain itu durasi injeksi ini dibatasi oleh waktu ikat bahan stabilisasi.

g) Radius lubang injeksi

Radius lubang injeksi berpengaruh terhadap radius sebaran *grouting*. Pada tanah pasir sebaran *grouting* jauh lebih besar dari pada radius lubang injeksi, sehingga untuk penyederhanaan variabel dapat diabaikan (Hou et al., 2019; Yang et al., 2019). Namun demikian, pada *clay shale* dimungkinkan radius sebaran *grouting* sebesar pada tanah pasir, sehingga pengaruh variabel ini perlu dipelajari.

1.2.2. Keberhasilan Sementasi

Proses sementasi merupakan proses pengikatan fragmen-fragmen oleh bahan *grouting*, dimana proses ini akan terjadi setelah injeksi selesai dilakukan. Fragmen-fragmen yang terikat oleh bahan *grouting* akan membentuk kolom *grouting*. Kuat dukung dari kolom *grouting* yang terbentuk dari *clay shale* yang tersementasi ini akan lebih tinggi dari pada kondisi sebelum tersementasi. Berdasarkan hal tersebut, ukuran kolom *grouting* dan kuat dukung merupakan dua indikator keberhasilan sementasi.

Ukuran kolom *grouting* merupakan indikator pertama keberhasilan sementasi. Indikator kolom *grouting* telah digunakan pada beberapa penelitian injeksi pada tanah pasir (Wang et al., 2016; Fu et al., 2019). Kolom *grouting* ini terbentuk oleh ikatan bahan *grouting* yang berhasil diinjeksikan, sehingga variabel volume injeksi (V_i) diduga berpengaruh terhadap ukuran kolom *grouting* yang terbentuk. Variabel V_i merupakan

turunan indikator proses injeksi, sehingga ukuran kolom *grouting* secara tidak langsung dipengaruhi variabel proses injeksi.

Evaluasi terbentuknya kolom *grouting* pada penelitian di laboratorium dapat dilakukan dengan memisahkan bagian yang tersementasi *grouting* dengan bagian yang tidak tersementasi (Wang et al., 2016; Fu et al., 2019), namun metode ini sulit diaplikasikan di lapangan. Keberadaan kolom *grouting* di dalam tanah menyerupai formasi batuan *dyke*. Metode *resistivity* merupakan metode geolistrik yang dapat digunakan untuk menggambarkan profil batuan (Telford et al., 1990), sehingga berpotensi dikembangkan untuk evaluasi terbentuknya kolom *grouting*.

Nilai kuat dukung awal tentunya mempengaruhi kuat dukung yang dihasilkan setelah injeksi. Sedangkan peningkatan kuat dukungnya dipengaruhi oleh keberhasilan sementasi oleh bahan *grouting*. Semakin besar kolom *grouting* yang terbentuk akibat sementasi *grouting*, peningkatan kuat dukung yang dihasilkan akan semakin besar. Selain itu, perbedaan jenis bahan yang digunakan antara semen dan *geopolymer* tentunya berpengaruh terhadap kuat dukungnya (Cristelo et al., 2013; Ghadir and Ranjbar, 2018). Perbedaan perbandingan campuran juga akan mempengaruhi kuat dukungnya. Semakin besar nilai rasio air semen (f_{PC}) pada pasta semen atau rasio aktivator *fly ash* (f_{GP}) pada *geopolymer*, akan menghasilkan kolom *grouting* yang semakin besar (Wang et al., 2016), hal ini karena viskositasnya semakin rendah sehingga bahan *grouting* dapat menyebar lebih mudah. Namun demikian penggunaan *grouting* dengan f_{PC} atau f_{GP} yang terlalu besar dapat menurunkan kuat dukungnya (Njock et al., 2018; Wang et al., 2018; Djaha et al., 2019).

1.3. Perumusan Masalah

Metode injeksi *grouting* telah banyak dikaji dan digunakan pada tanah granular berupa pasir atau kerikil. *Clay shale* yang terdegradasi penuh berbentuk fragmen-fragmen sehingga secara tekstur menyerupai tanah granular. Namun demikian, fragmen-fragmen *clay shale* merupakan mineral lempung sehingga perilaku injeksi *grouting* dimungkinkan berbeda pada tanah pasir atau kerikil. Material semen telah banyak digunakan untuk injeksi tanah pasir, sedangkan penggunaan *geopolymer* telah dikembangkan untuk pada stabilisasi tanah. Namun demikian, sejauh pustaka yang didapatkan penelitian injeksi *clay shale* menggunakan pasta semen atau *geopolymer* belum pernah dilakukan. Berdasarkan

kondisi tersebut, rumusan masalah pada injeksi *grouting* pada *clay shale* adalah sebagai berikut:

- a) Diantara pasta semen dan *geopolymer*, material apa yang cocok digunakan untuk injeksi *clay shale*?
- b) Variabel-variabel apa yang berpengaruh terhadap keberhasilan proses injeksi, dan bagaimana pengaruh masing-masing variabel?
- c) Metode apa yang dapat digunakan untuk identifikasi ukuran kolom *grouting*, dan bagaimana pengaruh variabel-variabel injeksi terhadap ukuran kolom *grouting*?
- d) Bagaimana pengaruh variabel-variabel injeksi terhadap nilai kuat dukungnya?
- e) Apakah terjadi sementasi fragmen-fragmen *clay shale* pada kolom *grouting*?

1.4. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah melakukan perbaikan *clay shale* yang telah terdegradasi dengan injeksi *grouting* untuk meningkatkan kuat dukungnya. Sedangkan tujuan dari penelitian ini adalah:

- a) Menyelidiki efektivitas bahan *grouting* pasta semen dan *geopolymer* untuk injeksi *clay shale*.
- b) Menyelidiki variabel-variabel yang berpengaruh terhadap proses injeksi *grouting* dan hubungan antar variabel tersebut.
- c) Mengembangkan metode identifikasi kolom *grouting*, mengidentifikasi variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kolom *grouting*, dan memformulasikan hubungan antar variabel-variabel tersebut.
- d) Menyelidiki variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kuat dukung *clay shale* yang diinjeksi *grouting*, hubungan antar variabel, dan menemukan nilai optimum dari masing-masing variabel.
- e) Menyelidiki sementasi pada kolom *grouting* secara mikro struktur.

1.5. Manfaat Penelitian

Keberhasilan dari penelitian ini diharapkan akan memberikan solusi dalam menyelesaikan permasalahan degradasi yang terjadi pada *clay shale*. Manfaat dari penelitian ini adalah:

- a) Metode injeksi dapat digunakan sebagai alternatif perbaikan *clay shale* yang telah terdegradasi dan digunakan sebagai rujukan dalam penelitian lebih lanjut.

- b) Penggunaan metode injeksi memiliki manfaat lebih dari pada metode *mixing* karena tidak memerlukan pembongkaran dan dapat mencapai kedalaman yang lebih besar.
- c) Pengembangan material bangunan dengan memanfaatkan limbah *fly ash* ini akan berdampak positif dari aspek lingkungan.
- d) Keberhasilan metode injeksi *grouting* pada *clay shale* akan memberikan peluang untuk dikembangkan dan diaplikasikan pada perbaikan tanah dasar *clay shale* di bawah perkerasan jalan raya maupun bandara.

1.6. Pembatasan (Ruang Lingkup) Masalah

Penelitian injeksi *grouting* pada *clay shale* dimaksudkan untuk meningkatkan kuat dukungnya, dimana metode ini telah banyak dikembangkan untuk tanah granular. Perilaku injeksi pada *clay shale* lebih kompleks dari pada tanah granular karena pengaruh mineral lempung dan tingkat degradasi dari *clay shale*. Untuk mengurangi kompleksitasnya, penelitian dilakukan pada kondisi terdegradasi penuh, dimana secara tekstur *clay shale* menyerupai tanah granular. Penelitian di laboratorium dilakukan untuk mempelajari variabel-variabel yang berpengaruh terhadap peningkatan kuat dukung. Meskipun penelitian di laboratorium memiliki keterbatasan, namun lebih mudah dalam mengkondisikan benda uji sesuai variabel yang dipelajari. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka penelitian perlu dibatasi, yaitu:

- a) Penelitian dilakukan di laboratorium dengan membuat benda uji dari *clay shale* terdegradasi penuh dan pengaruh tingkat degradasi tidak dipelajari.
- b) Indikator utama keberhasilan dibatasi pada kuat dukung dengan metode pengujian tekan bebas (USC), sedangkan indikator durabilitas tidak dipelajari. Berdasarkan pengujian tersebut, ukuran benda uji mengacu pada standar pengujian UCS tersebut.
- c) Ukuran butir fragmen *clay shale* merujuk pada butiran maksimum untuk benda uji UCS, sehingga ukuran butir granular dari fragmen *clay shale* yang digunakan untuk pembuatan benda uji terbatas.
- d) Semen yang digunakan adalah semen PCC yang mudah dijumpai di pasaran, dengan variabel yang dipelajari adalah rasio air semen.

- e) *Geopolymer* dibuat dari bahan *fly ash*, dengan aktivator berupa larutan NaOH dan Na_2SiO_3 . Pengamatan bahan *grouting* semen dan *geopolymer* dibatasi pada perbandingan antara bahan cair dan padatnya, yaitu rasio air semen pada pasta semen dan rasio aktivator *fly ash* pada *geopolymer*.

1.7. Sistematika Penulisan

Disertasi disusun dalam 2 (dua) bagian, yaitu bagian depan dan bagian isi. Bagian depan dimulai dari lembaran judul, sampai dengan daftar lampiran, sedangkan bagian isi terdiri atas Bab 1 sampai Bab 6. Sistematika penulisan disajikan sebagai berikut ini.

Bab 1. Pendahuluan

Pendahuluan memuat latar belakang masalah, identifikasi masalah, perumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, pembatasan masalah dan sistematika penulisan. Latar belakang berisikan permasalahan degradasi pada *clay shale* akibat proses pelapukan sehingga perlu dilakukan perbaikan. Identifikasi masalah berisikan permasalahan stabilisasi dengan metode *mixing* dan gagasan diusulkannya metode injeksi.

Bab 2. Kajian Pustaka, dan Kerangka Berpikir

Bab ini berisikan tentang kajian literatur, uraian tentang teori yang relevan, uraian teori tentang variabel penelitian secara rinci, kerangka berpikir, kebaruan (*noveltis*), hipotesis penelitian. Kajian pustaka meliputi degradasi pada *clay shale*, metode stabilisasi, metode injeksi, kolom *grouting*, dan kuat dukung.

Bab 3. Metode Penelitian

Metode penelitian berisikan alur penelitian, penyiapan dan pengujian bahan, peralatan, pembuatan benda uji, proses injeksi, pengujian kolom *grouting*, pengujian kuat dukung, dan pengujian *resistivity*.

Bab 4. Kompilasi dan Analisis Data

Bab ini berisikan kompilasi dan analisis data dari tahap proses injeksi, pengujian kolom *grouting* dan pengujian kuat dukung. Pada tahap injeksi analisis data dilakukan untuk mendapatkan volume *grouting* yang berhasil diinjeksikan, analisis data pengujian kolom *grouting* dilakukan untuk mendapatkan radius

kolom *grouting*, dan analisis nilai kuat dukung dilakukan berdasarkan data uji tekan bebas

Bab 5. Pembahasan Hasil Penelitian

Bab ini menyajikan pembahasan hasil-hasil pengujian volume injeksi, kolom *grouting*, kuat dukung, dan perbandingan keberhasilan antara injeksi pasta semen dan *geopolymer*. Pembahasan hasil pengujian volume injeksi meliputi pengaruh variabel injeksi dan hubungan antar variabel injeksi. Pembahasan pengujian kolom *grouting* meliputi metode pengujian, pengaruh variabel injeksi terhadap ukuran kolom *grouting* dan hubungan antar variabel injeksi. Pembahasan kuat dukung meliputi variabel yang berpengaruh dan hubungan antar variabelnya. Perbandingan keberhasilan antara injeksi pasta semen dan *geopolymer* berdasarkan ukuran kolom *grouting* dan kuat dukung yang dihasilkan

Bab 6. Kesimpulan, Implikasi dan Saran atau Rekomendasi

Bab ini berikan kesimpulan, implikasi hasil penelitian dan saran-saran.

Daftar Pustaka