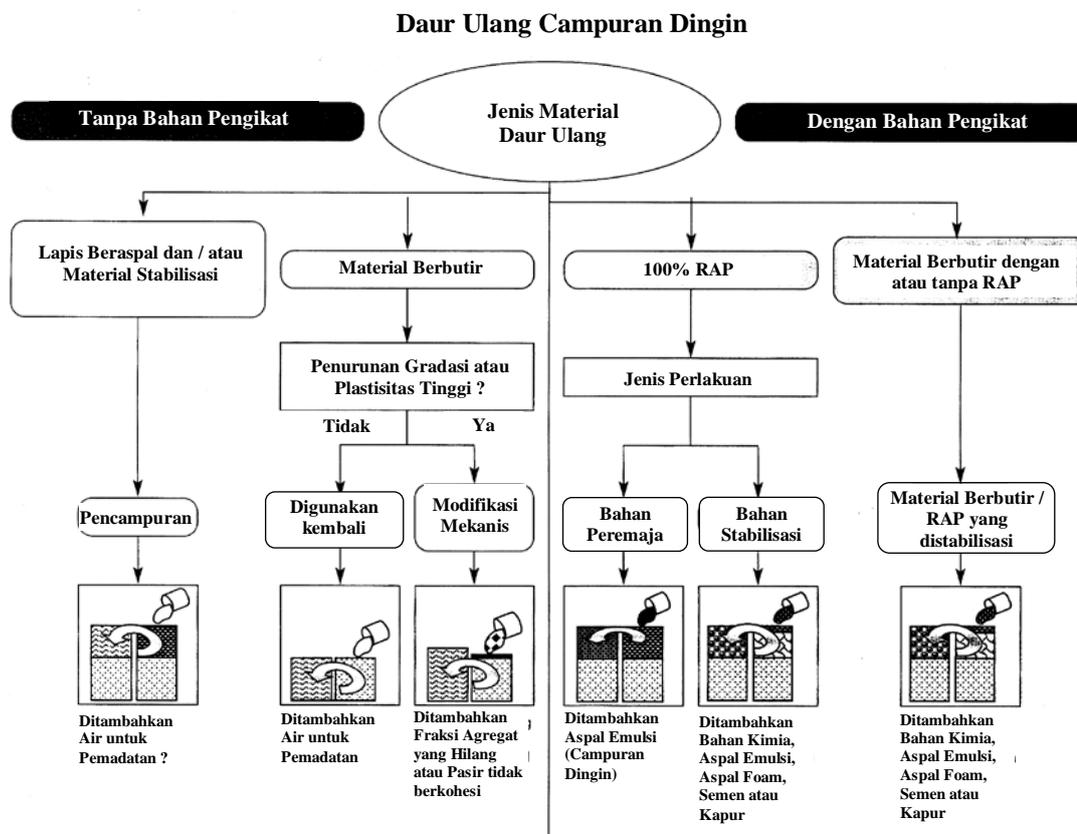


## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN KERANGKA PEMIKIRAN

#### 2.1. Daur Ulang Campuran Dingin

Teknik daur ulang campuran dingin adalah salah satu teknik rehabilitasi lapis perkerasan yang sudah dikenal dan berkembang pesat saat ini. Teknologi ini, dapat dilakukan langsung di tempat pelaksanaan (*In-place Cold Recycling*) dengan menggunakan mesin pendaur ulang atau dapat juga dilakukan di depot tempat pencampuran (*In-plant Cold Recycling*) dengan mengangkat material yang akan didaur ulang ke unit prosesor seperti *pugmill-type mixer*. Disamping itu teknik ini dapat juga dilakukan dalam dua cara yaitu dengan dan tanpa menambahkan bahan stabilisasi. Gambar 2-1. menunjukkan dua kategori daur ulang campuran dingin berdasarkan cara stabilisasi dan tahapan prosedur yang harus dilakukan berdasarkan masing-masing cara stabilisasi (Wirtgen, 2004).



Gambar 2-1. Kategori Daur Ulang Campuran Dingin (Wirtgen, 2004)

Material yang akan didaur ulang adalah material perkerasan jalan yang sudah rusak, baik material agregat yang mengandung bahan aspal dikenal dengan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) maupun material agregat yang tidak mengandung bahan aspal dikenal dengan *Reclaimed Aggregate Material* (RAM). Proses pencampuran dilakukan dengan menggunakan bahan stabilisasi dan penambahan agregat baru ataupun tanpa bahan stabilisasi dan agregat baru. Bahan stabilisasi yang biasa ditambahkan pada material daur ulang adalah semen, aspal emulsi, aspal cair (*cut back*) dan *foam bitumen*. Campuran dari material RAP dan atau RAM dengan tambahan material stabilisasi semen dikenal dengan *cement treated recycled material*. Proses daur ulang yang dilakukan di depot tempat pencampuran lebih mahal jika dibandingkan dengan daur ulang langsung di tempat pelaksanaan, karena adanya biaya angkutan material dari lokasi pengerukan ke depot tempat pencampuran dan sebaliknya. Sedangkan daur ulang langsung di tempat pelaksanaan tidak membutuhkan biaya pengangkutan dan tempat penimbunan material. Namun demikian, kedua metode ini memiliki kelemahan dan keunggulannya masing-masing sehingga untuk menentukan proses mana yang akan dipakai perlu mempertimbangkan beberapa hal di bawah ini:

- 1) Jenis konstruksi.
- 2) Proses daur ulang di tempat pencampuran (*In-plant*) biasanya dilakukan bila material yang didaur ulang digunakan sebagai lapis perkerasan yang baru untuk memperkuat perkerasan yang sudah ada.
- 3) Material yang akan didaur ulang (*In-situ material*)
- 4) Material dari perkerasan lama yang mengalami kerusakan biasanya membutuhkan beberapa perlakuan agar layak digunakan sebagai lapis perkerasan, seperti pemecahan dan mengukur kadar aspal yang ada pada campuran perkerasan lama.

### **2.1.1. Daur Ulang di Depot Tempat Pencampuran (*In-Plant Recycling*)**

Daur ulang di depot tempat pencampuran sering menjadi pilihan dalam menentukan metode daur ulang yang akan dipakai terutama jika perlu mencampur material yang akan didaur ulang dengan material baru dan menggunakan bahan pengikat *foam bitumen* karena menggunakan material yang perlu disimpan untuk digunakan nanti. Keuntungan yang diperoleh jika menerapkan metode ini adalah:

- 1) Kekuatan campuran mendekati sifat campuran baru
- 2) Mutu campuran lebih mudah diatur
- 3) Geometrik jalan lebih mudah untuk disesuaikan

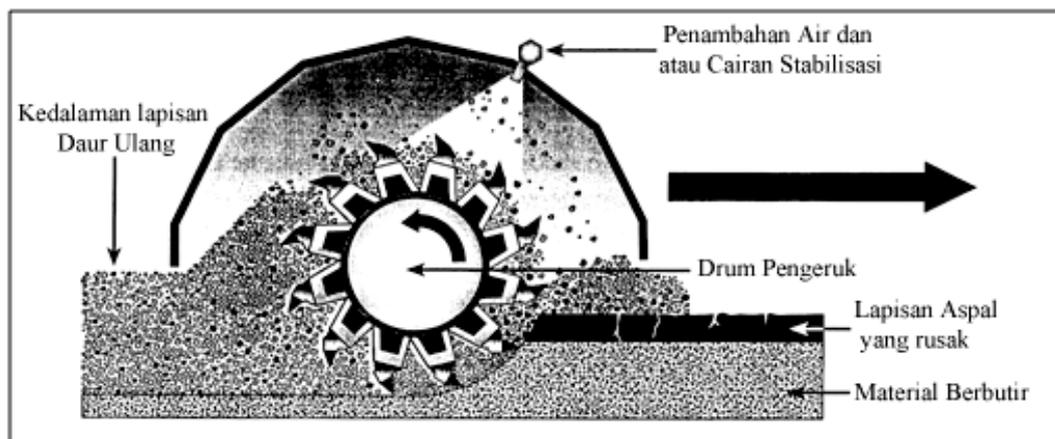
Sedangkan kelemahan dari metode ini adalah:

- 1) Diperlukan pengangkutan hasil garukan ke lokasi mesin pencampur
- 2) Bagian bekas garukan harus diamankan sebelum dihampar kembali
- 3) Memerlukan tempat untuk menyimpan material hasil garukan
- 4) Membutuhkan biaya yang besar untuk menyediakan bahan bakar dan transportasi material.

Peralatan yang dibutuhkan untuk metode ini adalah dapat dilakukan dengan memodifikasi alat pencampur aspal (AMP) yang ada saat ini.

### 2.1.2. Daur Ulang di Tempat Pelaksanaan (*In-Place Recycling*)

Daur ulang di tempat pelaksanaan adalah metode daur ulang dimana penggarukan, pencampuran, pembentukan dan pemadatan dilaksanakan langsung di tempat. Dengan berkembangnya peralatan daur ulang seperti alat penggaruk (*Pulverization Machine*), alat pencampur, alat pengaduk dan penghampar (*Recycler*) serta alat pemadat, maka teknik daur ulang langsung di tempat pelaksanaan semakin berkembang pula. Peralatan daur ulang modern telah berkembang dalam kapasitas yang besar. Teknik campuran dingin langsung di tempat pelaksanaan dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa bahan stabilisasi baik berupa bahan kimia maupun berupa bahan stabilisasi konvensional seperti aspal atau semen. Gambar 2-2. memperlihatkan bagaimana mesin pendaur ulang bekerja menggaruk, mencampur dan menghamparkan kembali material daur ulang langsung di tempat pelaksanaan. Sedangkan Gambar 2-3. adalah rangkaian peralatan yang digunakan untuk proses daur ulang langsung ditempat dengan campuran dingin yang distabilisasi dengan semen (Wirtgen, 2004).



**Gambar 2-2.** Proses Daur Ulang ditempat pelaksanaan (Wirtgen, 2004)



**Gambar 2-3.** Rangkaian Peralatan untuk Daur Ulang Di Tempat Stabilisasi Dengan Semen (Wirtgen, 2004)

Dalam proses daur ulang yang distabilisasi dengan semen, ada 7 (tujuh) tahapan pelaksanaan konstruksi yang urut-urutannya adalah sebagai berikut :

- 1) Pengupasan lapis perkerasan beraspal yang lama dan pemecahan dilakukan dengan menggunakan alat *pulverization machine*
- 2) Penghamparan material stabilisasi semen dengan alat *cement spreader*
- 3) Proses *recycling* dengan alat *recycler*
- 4) Proses pemadatan dengan menggunakan alat *vibro padfoot* (20 ton)
- 5) Proses pembentukan lapis permukaan perkerasan (*leveling*) dengan alat *grader*
- 6) Proses pemadatan dengan alat *tandem roller* (12 ton)
- 7) Proses pemadatan dengan *pneumatic tire roller*.

Sebagaimana telah dijelaskan pada bab pendahuluan, bahwa teknik konstruksi perkerasan jalan yang ramah lingkungan karena penggunaan energi dan bahan bakar yang relatif sedikit adalah metode daur ulang campuran dingin langsung di tempat. Penggunaan energi yang kecil dan pemanfaatan kembali material lama untuk digunakan kembali pada konstruksi perkerasan jalan, menjadikan teknologi ini bukan saja ramah lingkungan tetapi juga murah. Namun demikian, metode ini memiliki beberapa kelemahan dan perlu adanya penyempurnaan baik dalam campuran maupun dalam pelaksanaan di lapangan. Oleh karena itu, metode daur ulang yang distabilisasi dengan semen untuk lapis pondasi (CTRB) perlu diteliti lebih mendalam, untuk mendapatkan formula campuran yang memiliki kekuatan dan durabilitas yang tinggi sehingga metode ini bukan saja memiliki keunggulan dari sisi kelestarian lingkungan alam tetapi juga unggul karena kinerja campurannya.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Kim et al. (2007) dan Guthrie et al. (2007) terhadap campuran lapis pondasi yang mengandung agregat RAP dan RAM tanpa bahan pengikat menunjukkan bahwa (Kim et al., 2007):

- 1) Campuran yang mengandung RAP dan RAM dengan kadar air optimum 65% lebih kaku dibandingkan dengan campuran dengan kadar air optimum 100% untuk semua *confining pressures*

- 2) Campuran dengan kandungan 50% agregat dan 50% RAP memiliki kekakuan yang hampir sama dengan kekakuan campuran dengan kandungan 100% agregat pada *confining pressures* rendah; sedangkan pada *confining pressures* tinggi, campuran yang mengandung RAP lebih kaku.
- 3) Pada keadaan dimana perubahan bentuk terjadi karena adanya beban axial, maka campuran yang mengandung RAP deformasi permanennya lebih besar daripada campuran yang mengandung 100% agregat. Meskipun demikian perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk mengetahui fenomena ini.

Sedangkan Guthrie et al. (2007) berpendapat bahwa:

- 1) Nilai CBR menurun 13% dan 29% pada setiap penambahan 25% RAP
- 2) Pada uji kekakuan, campuran dengan kandungan RAP 0-25% pada kadar air optimum, kekakuannya cenderung menurun dan meningkat kembali pada setiap penambahan RAP 25-100%
- 3) Campuran yang mengandung 0-25% RAP pada 72 jam kering oven menunjukkan peningkatan kekakuan dan menurun kembali pada penambahan RAP > 25%
- 4) Campuran dengan penambahan 25-50% RAP, kerentanan terhadap pengaruh kadar air meningkat dibandingkan dengan campuran yang tidak mengandung RAP, namun demikian campuran menjadi lemah karena ketidak lembaban jika kandungan RAPnya >75%
- 5) Dianjurkan untuk dilakukan stabilisasi lapis pondasi untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan dari material daur ulang.

Dari hasil kedua penelitian diatas dapat dilihat adanya ketidak konsistensian antara kekuatan dan kekakuan campuran RAP dengan RAM, sehingga perlu ditambahkan material stabilisasi untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan campuran.

## **2.2. Daur Ulang Campuran Dingin Distabilisasi Dengan Semen**

Daur ulang lapis perkerasan jalan dengan menggunakan bahan stabilisasi semen, biasanya digunakan pada lapis pondasi, baik pada lapis pondasi atas (*base course*) dikenal dengan *Cement Treated Recycled Base* (CTRB) atau pada lapis pondasi bawah (*subbase course*) dikenal dengan *Cement Treated Recycled Subbase* (CTRSB). Mekanisme penambahan semen terhadap material agregat mengakibatkan terjadinya hidrasi pertukaran kation, karbonasi fisika, reaksi pozolanik dan sementasi baru.

Maksud utama dari penambahan semen adalah untuk meningkatkan kekuatan campuran seiring dengan terjadinya proses pemadatan karena proses hidrasi yang terjadi antara semen, air dan material agregat. Meningkatnya kekuatan dari campuran dinyatakan

dengan meningkatnya nilai Resilien Modulus ( $M_R$ ) sebagaimana dinyatakan oleh Puppala et al. (2011) dan Qiang et al. (2011) atau nilai kuat tekan campuran (*Unconfined Compressive Strength*, UCS) sebagaimana dinyatakan oleh Tsuchida et al. (2009) dan Silva et al. (2009). Menurut Miller et al. (2007), kelembaban adalah faktor yang sangat mempengaruhi kinerja jangka panjang lapis pondasi perkerasan jalan, oleh karena itu, penambahan semen pada campuran lapis pondasi juga dimaksudkan untuk mengurangi efektifitas pengaruh kelembaban terhadap kerusakan konstruksi lapis pondasi jalan. Persentase kadar semen dalam campuran harus diberikan pada batas tertentu, karena kelebihan kadar semen dalam campuran akan mengakibatkan campuran terlalu kaku dan mudah retak.

Metode daur ulang lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen (CTRB) merupakan pengembangan dari metode stabilisasi tanah dengan semen (Ingles and Metcalf, 1972; Highway Research Board, 1961) dan metode stabilisasi lapis pondasi dengan semen, CTB (Departemen Pekerjaan Umum, 2005; Davis et al., 2007; Loizos et al., 2007; Qiang et al., 2011). Disamping itu, ada faktor-faktor lain yang menunjukkan kekuatan campuran yang perlu diperhatikan yaitu nilai kuat tarik campuran (*Indirect Tensile Strength*, ITS), potensi retak dan durabilitas. Metode stabilisasi dengan semen, sebagaimana telah dibuktikan dalam beberapa penelitian sebelumnya, telah berhasil dilakukan untuk konstruksi lapis tanah dasar perkerasan jalan, untuk bantalan perletakan pipa, untuk pondasi bendungan dan lain-lain, juga untuk stabilisasi lapis pondasi perkerasan jalan dengan semen (CTB dan CTSB) (Lorenzo and Bergado, 2006; Silva et al., 2009; Trhlikova et al., 2009; Bertolini et al., 2010; Joel and Agbede, 2011; Estabragh et al., 2011).

Untuk material daur ulang lapis pondasi perkerasan jalan, penambahan semen juga dimaksudkan untuk meningkatkan *Compressive Strength* material campuran serta meningkatkan daya tahan campuran terhadap tekanan air dan pengaruh reaksi kimia. Penelitian terhadap material daur ulang (RAP) yang distabilisasi dengan semen untuk lapis pondasi (CTRB), yang dilakukan oleh Puppala et al. (2011) menunjukkan bahwa penambahan 2% semen pada campuran meningkatkan nilai  $M_R$  dari material RAP sebesar 32%, sedangkan penambahan 4% semen mengakibatkan peningkatan  $M_R$  sebesar 50%. Sebaliknya, nilai  $M_R$  dari material RAP tanpa stabilisasi semen meningkat dengan meningkatnya penambahan tekanan *Confining*, dimana hal ini tidak dapat diaplikasikan terhadap material yang distabilisasi semen karena sifatnya yang kaku. Kelemahan dari metode ini adalah terjadinya retak karena sifat material yang kaku, sebagaimana sifat campuran semen pada umumnya. Pada keadaan dimana temperatur udara berada diatas 40<sup>0</sup> C, dimana material cenderung mencapai kekuatannya dengan cepat, penggunaan material stabilisasi alternatif selain Portland semen seperti *slag*, material pozolan dan atau kapur

sebagai material yang memiliki tingkat pencapaian kekuatan yang lambat perlu untuk diteliti (Wirtgen, 2004).

Pada lapis perkerasan jalan, keretakan perkerasan dapat mengakibatkan merembesnya air dan partikel-partikel halus pada badan jalan. Merembesnya air dan partikel halus pada konstruksi perkerasan jalan akan mengakibatkan semakin besarnya keretakan, terutama dengan adanya beban berulang pada perkerasan jalan (Wirtgen, 2004). Demikian juga untuk campuran semen lainnya, keretakan pada material campuran semen akan mengakibatkan merembesnya air dan partikel-partikel halus pada konstruksi (Pourasee et al., 2011). Penelitian yang dilakukan oleh Bentz et al. (2009) terhadap campuran semen pasta menunjukkan bahwa pengurangan ratio perbandingan kadar air dan kadar semen (w/c) secara nyata meningkatkan *compressive strength* dari campuran, tetapi juga meningkatkan *autogenous shrinkage* (penyusutan) serta meningkatkan kenaikan *temperature semidiabatic*, dimana keduanya dapat meningkatkan kecenderungan retak pada awal umur campuran semen.

Dari penelitian yang dilakukan oleh Sengul dan Tasdemir (2009) terhadap campuran beton dengan tambahan *fly ash* dan *slag* menunjukkan bahwa sekalipun UCS berkurang karena adanya penambahan material pozolan, namun pada hari ke 28 kekuatan dari campuran meningkat menjadi 34,2 dan 72,8 MPa pada ratio w/c 0,60 dan 0,38. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa permeabilitas campuran terhadap chlorida berkurang secara substansial dengan adanya material pozolan dalam campuran beton. Dari penelitian ini terlihat bahwa pengaruh penambahan material pozolan lebih efektif dari pada mengurangi ratio w/c. Disamping itu, mahalnya biaya konstruksi campuran beton sangat berhubungan dengan jumlah konsumsi semen yang digunakan. Oleh karena itu, metode substitusi sebagian material semen dengan material lain seperti *fly ash* atau material pozolan lainnya dapat dikembangkan (Jongpradist et al., 2010). Dari penelitian yang dilakukan oleh Jongpradist et al. (2010), data *unconfined compressive test* menunjukkan adanya peningkatan pada UCS dan  $M_R$  seiring dengan bertambahnya persentase kandungan *fly ash* dalam campuran. Dengan kandungan semen > 10%, *fly ash* dapat digunakan sebagai material substitusi parsial semen.

Penelitian yang dilakukan oleh Indrawati and Manaf (2011) yaitu dengan mensubstitusi 20% semen dengan tras terhadap campuran beton, memberikan fenomena yang positif dan juga negatif, karena menunjukkan kinerja yang rendah pada pengujian hari ke 28. Untuk mendapatkan kinerja yang setara atau mendekati kinerja campuran semen perlu ditambahkan aktifator kimia yaitu 0,1%  $CaCl_2$  + 0,9% Ca-PNS pada campuran Portland semen tras 80:20. Demikian pula penelitian yang dilakukan oleh Yetgin dan

Cavdar (2006) terhadap campuran semen yang disubstitusi sebagian dengan pozolan alam, terlihat bahwa meskipun pada awalnya kekuatan campuran semen dan pozolan alam yang ditunjukkan oleh *compressive strength* rendah dibandingkan dengan campuran tanpa material pozolan, namun nilai *compressive strength*nya meningkat pada hari-hari selanjutnya. Selanjutnya dikatakan bahwa khusus untuk beton atau pasta semen yang diaplikasikan pada struktur dimana durabilitasnya lebih dibutuhkan dari pada kekuatannya, durabilitas dapat diperoleh tanpa harus mengurangi kekuatan minimum sebagaimana yang disyaratkan yaitu 32,5 MPa, dengan cara menambahkan jumlah semen relatif lebih banyak yang memiliki karakteristik kekuatan tinggi. Dalam penelitian ini campuran semen dengan kekuatan 37,8 MPa (kekuatan rata-rata) dan 32,5 MPa (kekuatan karakteristik) dapat diperoleh dengan menambahkan pada campuran semen yang memiliki kekuatan 60,8 MPa (kekuatan rata-rata) dan 52,5 MPa (kekuatan karakteristik) pozolan alam sebesar 35% dari total berat campuran. Disisi lain, penambahan kandungan pozolan alam pada campuran meningkatkan *workability* dan kebutuhan akan air hanya meningkat relatif sedikit untuk mencapai konsistensi yang sama. Penambahan kandungan pozolan alam juga mengakibatkan penundaan awal dan akhir *setting time* (20 menit) dan pengurangan 2/3 volume tingkat ekspansi dari semen matriks. Hal ini merupakan bukti penting bahwa pozolan alam dapat memberikan kontribusi penting pada daya tahan campuran beton.

Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Monkman and Shao (2006) terhadap campuran semen dengan penambahan *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBF) dan *electric arc furnace slag* (EAF) sebagai material pozolan, menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dan EAF memiliki keuntungan tambahan pada tingginya pencapaian kekuatan awal. *Fly ash* mengandung  $\text{Ca(OH)}_2$  yang tinggi dan berfungsi untuk meniadakan kebutuhan akan air yang berlebihan, dengan demikian dapat memberikan reaksi yang besar, hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Yetgin and Cavdar (2006). Aspek ini merupakan faktor yang positif untuk rancangan campuran semen yang mendorong pemanfaatan karbon dioksida dan pencapaian kekuatan campuran. Hal ini menjadi catatan bahwa pemanfaatan limbah industri seperti *slag* dan *fly ash* dapat meningkatkan pencapaian kekuatan campuran (Monkman and Shao, 2006)

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Arora and Aydilek (2005) terhadap lapisan tanah yang distabilisasi dengan semen dan *fly ash* dan dibandingkan dengan tanah yang distabilisasi dengan kapur dan *fly ash* menghasilkan bahwa nilai CBR,  $M_R$ , dan  $q_u$  meningkat bersamaan dengan penambahan kadar semen dalam campuran dan menurun pada saat kandungan semen melebihi 5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kadar semen >5% tidak mengakibatkan bertambahnya kekuatan campuran. Disamping itu adanya

penambahan kadar semen dalam campuran mengakibatkan berkurangnya tebal lapis pondasi yang dibutuhkan. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa campuran yang mengandung material halus yang bersifat kohesif tidak selalu mengakibatkan berkurangnya tebal perkerasan yang dibutuhkan, sehingga penggunaan material halus yang tidak bersifat kohesif seperti tanah berpasir untuk lapis pondasi perkerasan jalan dapat dilakukan.

Osman and Tabbaa (2009) melakukan penelitian stabilisasi tanah lempung dengan semen-zeolite (pozolan alam) dibandingkan dengan tanah lempung yang distabilisasi dengan semen saja, ternyata stabilisasi tanah dengan semen-zeolite lebih kuat dan tahan terhadap pengaruh pembekuan dan pencairan serta tahan terhadap pengaruh reaksi kimia seperti sulfat dan asam (*acid*), terlihat dari tidak adanya retak pada benda uji selama jangka waktu diatas 1,5 tahun. Sebagai material pozolan, zeolite mengkonsumsi  $\text{Ca(OH)}_2$  yang terbentuk selama proses hidrasi untuk menghasilkan produk bersifat seperti semen (*cement like product*). Penambahan zeolite mengurangi tingkat ketersediaan  $\text{Ca(OH)}_2$  yang berpengaruh pada proses ekspansi dari campuran, sehingga ekspansi yang mungkin terjadi dapat dikurangi. Brooks et al. (2011) mendapatkan dalam penelitian yang dilakukannya terhadap tanah di Filadelfia yang distabilisasi dengan *fly ash* dan *limestone dust* bahwa *fly ash* dan *limestone dust* sangat berpengaruh terhadap pemadatan (CBR) dan kekuatan (UCS) dari tanah yang distabilisasi. Demikian juga plastisitas dan *swell* dari tanah berkurang sebesar 40% atau berkisar antara 40-70%.

Penelitian terhadap tanah lempung yang distabilisasi dengan semen dan fly ash dengan menggunakan pengujian *unconfined compression test* dan pengujian fisik (Jongpradist et al., 2010) menghasilkan bahwa pada persentasi semen tertentu, *fly ash* dapat mengganti sebagian semen dalam campuran dan menghasilkan peningkatan kekuatan serta perbaikan karakteristik fisik campuran. Kekuatan campuran tanah lempung yang distabilisasi dengan semen dan *fly ash* pada kadar air yang tinggi meningkat dengan meningkatnya kandungan semen dalam campuran dan lamanya waktu perawatan, dan menurun disaat kadar air meningkat. Efisiensi dari *fly ash* tergantung pada besarnya kandungan semen, *fly ash* dan air dalam campuran.

Penelitian yang dilakukan oleh Davis et al. (2007) terhadap agregat lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen (CTB), menunjukkan bahwa jenis mineral agregat sangat berpengaruh pada kekuatan CTB. Kekuatan campuran meningkat dengan meningkatnya pH campuran dan persentasi semen. Dalam penelitian ini juga terlihat bahwa kandungan agregat halus dalam campuran tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai UCS campuran, namun berpengaruh positif terhadap efek pembekuan dan pencairan. Hal ini terbukti dengan

meningkatnya UCS seiring dengan bertambahnya kandungan agregat halus pada pengujian pembekuan dan pencairan.

Penelitian yang dilakukan oleh Taha et al. (2002) terhadap campuran RAP dan RAM yang distabilisasi dengan semen untuk lapis pondasi atas dan pondasi bawah perkerasan jalan menunjukkan hasil sebagai berikut:

- 1) Kadar air optimum, berat kering maksimum dan UCS secara umum akan meningkat seiring dengan meningkatnya persentasi agregat baru dan semen.
- 2) Untuk campuran dengan 100% RAP dapat digunakan sebagai campuran untuk lapis pondasi jika distabilisasi dengan semen.
- 3) Penambahan semen dalam campuran RAP lebih efektif dibandingkan dengan penambahan agregat baru.

Penelitian yang dilakukan oleh Brown (2006) terhadap material RAP dan RAM yang distabilisasi dengan semen merekomendasikan bahwa kandungan RAP yang dapat digunakan pada campuran yang distabilisasi dengan semen berkisar antara 50-75%, dengan kadar semen dalam campuran sebesar 1%. Kandungan semen  $\leq 1\%$  tidak cukup untuk menstabilkan campuran, sedangkan kandungan semen  $\geq 1\%$  akan berakibat retak. Penelitian lain yang dilakukan terhadap jenis campuran yang sama yaitu RAP dan RAM yang distabilisasi dengan semen menunjukkan bahwa kandungan RAP dalam campuran berpengaruh positif pada kekuatan, nilai modulus dan durabilitas campuran sebagaimana yang dinyatakan oleh Yuan et al., 2010 sebagai berikut:

- 1) Untuk nilai kekuatan 300 psi dapat diperoleh dengan kadar semen 4%; 3%; 2% untuk kadar RAP 100%; 75% dan 50%.
- 2) Hasil pengujian UCS, ITS dan FFRD modulus menunjukkan data yang cukup konsisten. Untuk nilai UCS 300-psi, nilai ITS dan FFRC modulus sebesar 40-psi dan 1000-ksi.
- 3) Nilai Dielektrik akhir kurang dari 10 menyatakan bahwa campuran bersifat *non-moisture-susceptible* untuk semua kombinasi kadar semen dan RAP.
- 4) Jumlah partikel halus yang terkandung dalam material RAP berpengaruh secara signifikan pada kekuatan dan modulus elastisitas campuran. RAP dengan kandungan partikel halus yang besar dapat meningkatkan kualitas dari campuran.
- 5) Kadar aspal dalam RAP tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan dan modulus elastisitas campuran RAP dengan semen.
- 6) Distribusi ukuran butir dari agregat kasar hanya berpengaruh sedikit terhadap kekuatan dan modulus elastisitas campuran RAP dengan semen.

Yuan et al. (2011) menyatakan bahwa material RAP yang mengandung agregat halus dalam jumlah yang besar, dapat meningkatkan mutu campuran RAP yang distabilisasi

dengan semen, hal ini sejalan dengan penemuan Brown (2006). Sedangkan distribusi ukuran butir dari agregat kasar, kecil pengaruhnya terhadap kekuatan dan modulus resilien dari campuran RAP yang distabilisasi dengan semen.

Khusus untuk material daur ulang RAP yang distabilisasi dengan semen dan *fiber glass* untuk lapis pondasi CTRB, menunjukkan adanya peningkatan kekuatan campuran bersamaan dengan bertambahnya persentasi semen dalam campuran dan dengan adanya *fiber glass* dalam campuran, yang terlihat dari tingginya *hydraulic conductivity* dari campuran (Hoyos et al., 2011). Penelitian terhadap material RAP juga dilakukan oleh Han et al. (2011) untuk campuran yang diaplikasikan pada lapis pondasi perkerasan jalan, hasilnya memperlihatkan bahwa penambahan kekuatan dengan *geocell*, yaitu material yang terbuat dari *Neoloy Polymeric Alloy*, terbukti meningkatkan kinerja perkerasan dengan cara menyebarkan beban roda kendaraan ke area yang lebih luas pada lapis perkerasan di bawahnya.

Dari beberapa penelitian terhadap campuran stabilisasi tanah yang distabilisasi dengan semen maupun campuran beton, terlihat bahwa penambahan material pozzolan pada campuran mengakibatkan terjadinya peningkatan stabilitas, durabilitas dan *workability*. Sementara pada campuran daur ulang (RAP dan RAM) yang distabilisasi dengan semen, penambahan material pozzolan alam belum pernah dilakukan dalam penelitian sebelumnya, kecuali dengan menambahkan *fiber glass* dan *geocell*.

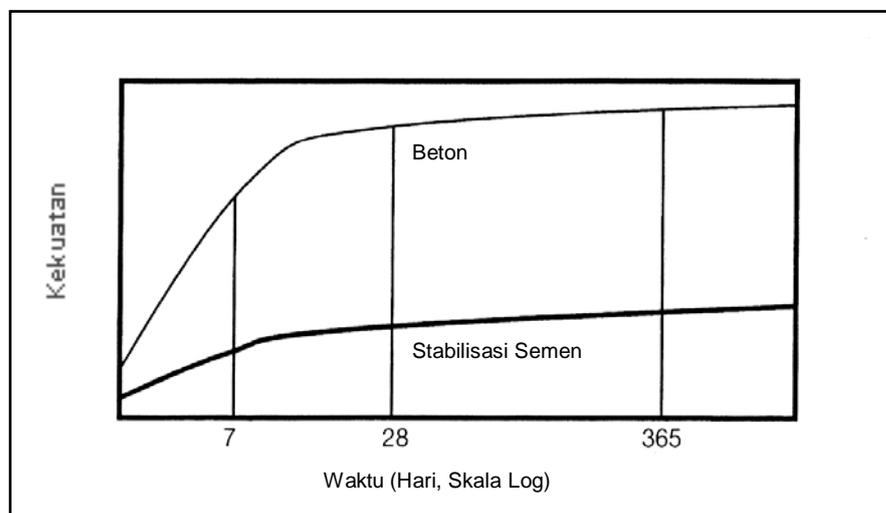
### **2.2.1. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Campuran Semen**

Kuat tekan (UCS), CBR,  $q_u$ , dan  $M_R$  campuran semen dicapai dengan menambahkan semen dalam campuran (Arora and Aydilek, 2005; Bentz et al., 2009), disamping itu kekuatan campuran juga tergantung pada jenis dan kepadatan material serta temperatur udara. Besarnya kekuatan yang dicapai hingga pada batas tertentu adalah berbanding lurus dengan jumlah semen yang ditambahkan, tetapi indikator ini berbeda untuk masing-masing jenis material agregat dan jenis semen. Kepadatan adalah faktor yang berperan dalam mencapai kekuatan mutlak, sedangkan temperatur udara berpengaruh pada tingkat kekuatan yang dapat dicapai. Penelitian yang dilakukan oleh Lotfi and Witczak (1982) menunjukkan bahwa pada campuran tanah berpasir, pengurangan tingkat kepadatan mengakibatkan peningkatan modulus respons. Hal ini menjelaskan bahwa kadar air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi semen tidak sama dengan kadar air yang dibutuhkan untuk mencapai kepadatan maksimum.

Demikian pula dengan kekuatan tekan, dimana kekuatan tekan maksimum dicapai pada saat kadar air lebih rendah dari kadar air optimum. Penelitian ini juga menunjukkan

bahwa faktor-faktor utama yang mempengaruhi  $M_R$  dari campuran agregat yang distabilisasi dengan semen adalah jumlah kadar semen dalam campuran, jenis material dan gradasi material. Tingginya temperatur udara akan mempercepat pencapaian kekuatan pada saat semen bercampur dengan air, maka proses pengikatan antara partikel semen dan air mulai berlangsung. Proses ini dapat terganggu oleh adanya proses pemadatan dan hal ini akan mengurangi tingkat kekuatan yang dapat dicapai, juga mengurangi kepadatan maksimum yang dapat dicapai. Oleh karena itu, pentingnya mempercepat proses penghamparan dan pemadatan setelah proses daur ulang adalah untuk mencapai kepadatan maksimum dan juga untuk mencapai kekuatan dari material perkerasan.

Pada keadaan dimana temperatur udara berada di atas  $40^0$  C dimana material cenderung mencapai kekuatannya dengan cepat, penggunaan material stabilisasi alternatif selain Portland semen, seperti *slag*, material pozolan dan atau kapur sebagai material yang memiliki tingkat pencapaian kekuatan yang lambat, perlu untuk diteliti. Gambar 2-4. menunjukkan hubungan antara waktu dan tingkat pencapaian kekuatan dari campuran beton dan campuran yang distabilisasi dengan semen, dimana dari grafik terlihat pencapaian kekuatan dari campuran beton jauh lebih tinggi dari campuran stabilisasi dengan semen karena penggunaan semen pada campuran beton jauh lebih besar (Wirtgen, 2004).



**Gambar 2-4.** Hubungan antara waktu dan kekuatan campuran (Wirtgen, 2004)

### 2.2.2. Retak pada Lapis Perkerasan Campuran Semen

Semua campuran semen termasuk beton memiliki kecenderungan menjadi retak. Tingkat pencapaian kekuatan baik UCS dan ITS dari material campuran semen adalah fungsi dari waktu seperti terlihat pada Gambar 2-4. Adanya tekanan tarik pada material campuran semen sebagai akibat adanya susut dan atau beban lalu-lintas jika melampaui kekuatan tarik

dari material akan mengakibatkan terjadinya retak. Retak yang demikian dapat diantisipasi sehingga tidak menyebabkan kerusakan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui kecenderungan retak dari material lapis perkerasan campuran semen yaitu yang diakibatkan oleh dua hal yang berbeda. Pertama, retak yang diakibatkan oleh reaksi kimia yang terjadi selama proses hidrasi semen dan kedua, retak yang diakibatkan oleh beban berulang dari lalu-lintas kendaraan. Retak yang diakibatkan karena adanya reaksi kimia terjadi di awal pengerasan sedangkan retak yang diakibatkan oleh beban lalu-lintas merupakan kelanjutan karena adanya retak yang disebabkan oleh reaksi kimia (Wirtgen, 2004).

#### 1) Retak Akibat Adanya Reaksi Kimia.

Retak akibat reaksi kimia terjadi karena adanya hidrasi semen dalam campuran. Terjadinya proses hidrasi semen meliputi fase-fase sebagai berikut: C3S, C2S, C3A dan C4AF dimana proses hidrasi berlangsung secara perlahan (*Stoichiometrically*) untuk membentuk produk hidrasi berupa *calcium silicates* (CSH), *aluminates*, *ferrites* dan *calcium hydroxides* (CH) sebagai produk sampingan. Adanya pozolan dalam semen menyebabkan reaksi pozolanik antara pozolan dan *calcium hydroxides*, dimana dalam proses ini ikatan antara partikel material terjadi (Indrawati and Manaf, 2011). Retak karena adanya reaksi kimia dalam campuran, dikenal dengan istilah *autogenous shrinkage*, dan ketika campuran mengering sesudah pemadatan dimana material mengalami perubahan volume atau menyusut, menyebabkan terjadinya retak yang dikenal dengan istilah retak akibat susut atau *drying shrinkage* dan keretakan ini yang sering terjadi pada campuran CTRB. Retak susut ini dapat terjadi sesudah pemadatan bahkan beberapa bulan sesudah itu. Keretakan ini merupakan salah satu sifat atau ciri dari material campuran semen dan dapat dihindari dengan melakukan perawatan yang benar. Intensitas (jarak antar retak) dan *magnitude* (lebar retak), atau derajat keretakan, pada umumnya dipengaruhi oleh :

##### (1) Kandungan semen.

Susut yang terjadi selama proses hidrasi adalah fungsi dari jumlah kadar semen yang terkandung dalam campuran. Peningkatan kadar semen mengakibatkan meningkatnya derajat keretakan dan hal ini menjadi alasan untuk mengurangi penambahan semen dalam campuran sebatas kebutuhan rencana.

##### (2) Jenis material yang distabilisasi.

Beberapa material memiliki kecenderungan menyusut lebih besar dari material yang lain bila dicampurkan dengan semen. Disamping itu, beberapa material yang bersifat plastis cenderung menjadi aktif, terjadi perubahan volume yang signifikan

diantara keadaan lembab dan kering. Pada material dengan index plastis ( $PI \geq 10\%$ ), penambahan kapur atau kombinasi kapur dan semen harus dilakukan untuk mengurangi sifat plastis dari campuran menjadi non-plastis.

(3) Kadar air optimum.

Derajat keretakan adalah fungsi dari kadar air yang hilang pada saat material mengering. Membatasi kadar air (mengurangi ratio w/c) pada saat pemadatan sebesar kurang dari 75% dari kadar air jenuh dapat mengurangi derajat keretakan secara signifikan.

(4) Derajat kering.

Di saat material campuran semen mengering, tekanan internal terjadi pada campuran. Derajat keretakan sebagian besar ditentukan oleh tingkat pencapaian kekuatan relatif terhadap perkembangan tegangan susut. Jika material mengering dengan cepat, maka tegangan susut suatu saat pasti akan lebih besar dari pencapaian kekuatan dan pola keretakan akan lebih padat berupa retak-retak halus (*typical hair-line*). Sedangkan material yang lambat mengering, pola keretakkannya lebih jarang tetapi lebih lebar. Perawatan yang baik dari lapis perkerasan secara lengkap akan melindungi lapisan permukaan dari pengeringan sehingga dapat mengurangi intensitas maupun magnitudo keretakan.

(5) Retak karena penyusutan material biasanya terjadi pada permukaan lapisan, karena proses pengeringan terjadi pada permukaan lapisan terlebih dahulu dan bentuknya pada arah vertikal tidak teratur, sehingga memungkinkan transfer beban melalui permukaan yang sudah retak.

2) Keretakan Karena Beban Lalu-lintas

Retak jenis ini terjadi karena material campuran semen mengalami tegangan yang berlebihan atau melampaui batas kelelahan. Keretakan terjadi pada bagian atas lapis perkerasan, dimana adanya beban lalu-lintas mengakibatkan tegangan geser (*shear stress*) yang maksimum, dan menyebabkan *fatigue*. Material *semi-brittle* dengan sifat fleksibilitas yang kurang mengakibatkan lapis perkerasan campuran semen sensitif terhadap beban berlebihan. Retak karena kelelahan (*fatigue*) terjadi setelah sejumlah beban berulang yang tidak terduga, retak seperti ini tidak mengakibatkan kerusakan secepatnya. Pada tingkat setelah retak terjadi, lapis perkerasan masih tetap bisa memikul beban lalu-lintas, tetapi modulus efektif berkurang. Intensitas dan lebar retak akan bertambah pada saat jalan dibebani lalu-lintas berulang-ulang, hal ini akan menambah besarnya keretakan hingga kerusakan permanen terjadi.

### **2.2.3. Material yang Digunakan pada Campuran CTRB:**

#### **2.2.3.1 Material Daur Ulang RAP dan RAM**

Material hasil garukan dari perkerasan lama yang mengalami kerusakan dapat berupa material yang mengandung aspal yang disebut *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan material agregat yang tidak mengandung aspal yang disebut *Reclaimed Aggregate Material* (RAM). Material hasil garukan dari perkerasan lama berupa RAP, mengandung bahan aspal, namun dalam campuran yang distabilisasi dengan semen diasumsikan bahwa secara keseluruhan partikel bahan garukan yang mengandung aspal tersebut dianggap sebagai agregat.

Untuk mengetahui pengaruh aspal yang terkandung dalam material hasil garukan (RAP) dapat dilakukan dengan pendekatan percobaan campuran dingin menggunakan aspal ekstraksi. Dari percobaan ini dapat diketahui persentase kandungan aspal yang terkandung dalam RAP. Kandungan aspal yang besar dalam RAP akan menjadikan campuran kurang kuat dibandingkan dengan RAP yang memiliki kandungan aspal yang kecil atau RAM (Guthrie et al., 2007 dan Attia et al., 2009). Berdasarkan Spesifikasi Khusus Cement Treated Recycling Base and Sub Base (CTRB and CTRSB) untuk campuran yang dicampur langsung ditempat (Bina Marga, 2006), material RAP dan RAM yang digunakan dalam campuran CTRB dan CTRSB harus bebas dari kandungan zat organik yang dapat mengganggu proses hidrasi dari semen portland dan memiliki kadar pH > 12,2 (setelah 1 jam pengujian) dengan Index Plastis (PI) maksimum sebesar 10%.

Gradasi RAP dan RAM ditentukan oleh proses atau alat yang digunakan untuk penggilingan atau penghancurannya, yaitu oleh jarak antar gigi dan kecepatan dari mesin penggiling (*milling machine*) atau mesin penghancur (*pulverization machine*) serta gradasi material asli perkerasan lama dimana RAP dan RAM itu diambil. RAP yang berasal dari lapis permukaan memiliki mutu yang tinggi, bergradasi baik dan terbungkus aspal (Saeed, 2008). RAP dan RAM yang diambil dari berbagai sumber yang berbeda memiliki karakteristik teknik berbeda satu dengan lainnya yang dipengaruhi oleh proses penggarukan, sumber material aslinya maupun kandungan dan jenis bahan pengikatnya. Gradasi agregat RAP dan RAM untuk campuran CTRB yang ditentukan dalam Spesifikasi Khusus *Cement Treated Recycling Base and Sub Base* untuk campuran yang dicampur langsung di tempat (Bina Marga, 2006), adalah memiliki ukuran diameter maksimum 1,5 inci (37,50 mm).

Dalam beberapa penelitian tentang campuran RAP dan RAM yang distabilisasi dengan semen, agregat yang digunakan adalah memanfaatkan agregat yang sudah ada dari perkerasan lama tanpa memperhatikan persyaratan spesifikasi gradasi yang berlaku, dan di beberapa negara bagian di Amerika Serikat, gradasi agregat untuk campuran CTRB dan

FDR mensyaratkan ukuran butiran maksimum sebesar 1,5 inci, dengan memperhatikan persentase material yang lolos saringan no.40 dan no.200 harus memenuhi persyaratan spesifikasi gradasi agregat untuk lapis pondasi perkerasan lentur yang distabilisasi dengan semen (AASHTO, 72), sebagaimana yang tercantum pada Tabel 2.1. Disamping itu, perhatian terhadap persentasi agregat yang lolos saringan no.10, no.40, dan no.200 diperlukan untuk menentukan klasifikasi material agregat sebagaimana yang disyaratkan dalam ASTM Designation: D 2487-06 (*Unified Soil Classification System*) dan AASHTO Designation: M145-91 (2004) seperti dapat dilihat pada Tabel 2.2. Untuk Klasifikasi Tanah menurut ASTM (2008) dan Tabel 2.3. Untuk Klasifikasi Tanah dan campuran Tanah Agregat menurut AASHTO (2004).

**Tabel 2.1.** Spesifikasi Gradasi Agregat untuk Lapis Pondasi Perkerasan Lentur yang di Stabilisasi dengan Semen (AASHTO, 1972)

Specification	Cement Treated		
	Class A	Class B	Class C
Sieve Analysis,			
% Passing			
2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> in.	100	100	100
<sup>3</sup> / <sub>4</sub> in.	--	--	75 – 95
No. 4	65 – 100	55 - 100	25 – 60
No. 10	20 – 45	--	15 – 45
N0. 40	15 – 30	25 - 50	8 – 30
No. 200	5 – 12	5 – 20	2 – 15

**Tabel 2.2. Bagan Klasifikasi Tanah (ASTM, 2008)**

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Test		Soil Classification	
		Group Symbol	Group Name
COARSE-GRAINED SOILS	Gravel	GW	Well-graded gravel
	(More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	GP	Poorly graded sand
		GM	Silty gravel
Retained on No. 200 sieve	Clean Gravels		
	(Less than 5% fines)		
	Gravel with Fines		
	(More Than 12% fines)	GC	Clayey gravel
	Clean Sands	SW	Well-graded sand
	(Less than 5% fines)	SP	Poorly graded sand
FINE-GRAINED SOILS	Sands		
	(60% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	SM	Silty sand
	Silts and Clays	SC	Clayey sand
	Liquid limit	CL	Lean clay
	Less than 50	ML	Silt
	No. 200 sieve		
HIGHLY ORGANIC SOILS	Organic	CL	Organic clay < 0.75
	(Liquid limit – oven dried)		
	Organic silt		
	(Liquid limit – not dried)		
	Inorganics	CH	Fat clay
	(PL plots on or above "A" line)		
	Organic	MH	Elastic silt
	(PL plots below "A" line)		
	Organic	CH	Organic clay < 0.75
	(Liquid limit – oven dried)		
Organic silt			
(Liquid limit – not dried)			
Primarily organic matter, dark in color, and organic color		PT	Peat

**Tabel 2.3** Klasifikasi Tanah dan Campuran Tanah - Agregat  
(AASHTO, 2004)

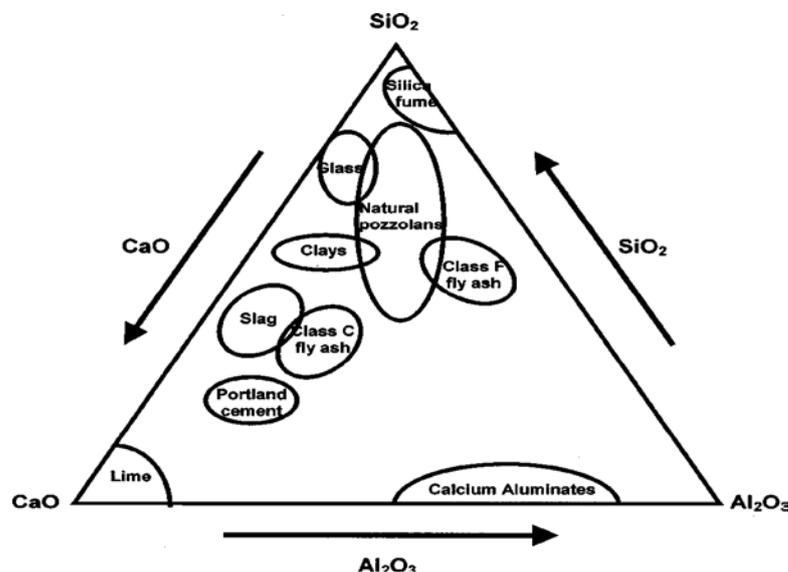
General Classification	Granular Materials (35% or Less Passing 75 µm)						Silt-Clay Materials (More Than 35% Passing 75 µm)						
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	A-7-5 A-7-6		
Group Classification	A-1-a	A-1-b	A-3			A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
Sieve analysis percent passing :	50 max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.00mm (No. 10)	30 max	50 max	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.425 mm ( No. 40)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 max	36 max	36 max	36 max	36 max
75 µm (No. 200)													
Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40) :													
Liquid limit	-	-	-	40 max	41 min	40 max	41 min	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	41 min
Plasticity index	6	NP	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min	11 min
Usual types of significant constituent materials	Stone Fragments, gravel and sand	Fine sand		Silty or clayey gravel and sand			Silty soils			Clayey soils			
General rating as subgrade	Excellent to Good						Fair to Poor						

### 2.2.3.2. Semen

Semen adalah bahan utama yang digunakan dalam konstruksi bangunan, baik gedung, menara, jembatan, jalan raya dan lain-lain yang telah digunakan manusia selama 9 milenium. Bagi orang awam, material ini nampak sederhana yaitu hanya sejenis bubuk yang jika ditambahkan air, material pengisi (pasir), dan agregat akan menghasilkan suatu campuran berair yang dapat dengan mudah dibentuk serta dicetak kemudian akan mengeras secara spontan pada keadaan temperatur normal. Namun demikian, tidak ada material lain yang menyamai keunikan material ini. Semen berfungsi sebagai bahan pengikat antar butir-butir agregat agar terbentuk suatu massa yang kompak dan padat. Salah satu material semen yang biasa digunakan dalam konstruksi saat ini adalah semen Portland.

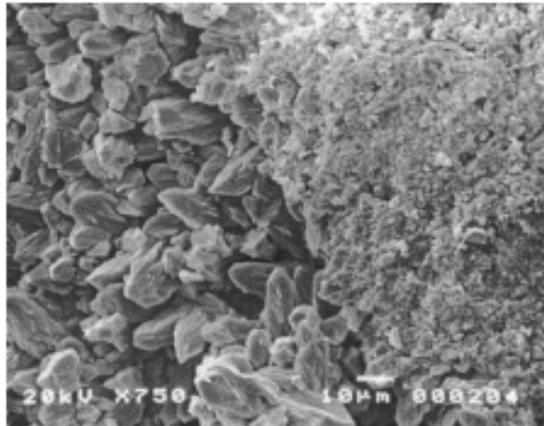
Berdasarkan Spesifikasi khusus CTRB dan CTRSB untuk campuran yang dicampur di tempat (*Mix in Place*), semen Portland yang digunakan untuk campuran CTRB adalah semen Portland tipe I yang memenuhi standar Industri Indonesia SII-13-1997 dan diperoleh dari pabrik yang diakui oleh kementerian Perindustrian Republik Indonesia.

Semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang mengandung silikat dan kalsium yang bersifat hidraulis dengan gips sebagai bahan tambahan. Bahan utama semen Portland adalah batu kapur ( $\text{CaO}$ ), silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 2-5. yaitu tentang *ternary diagram* unsur-unsur kimia yang terkandung dalam semen (Bentur, 2002). Ketiga bahan dasar ini dicampur dan dibakar dengan suhu  $1550^\circ\text{C}$  dan menjadi klinker, kemudian didinginkan dan dihaluskan hingga berupa bubuk. Sesudah proses ini, dilakukan penambahan gips atau kalsium sulfat ( $\text{CaSo}_4$ ) sebanyak 2-4% sebagai bahan pengontrol waktu pengikatan.



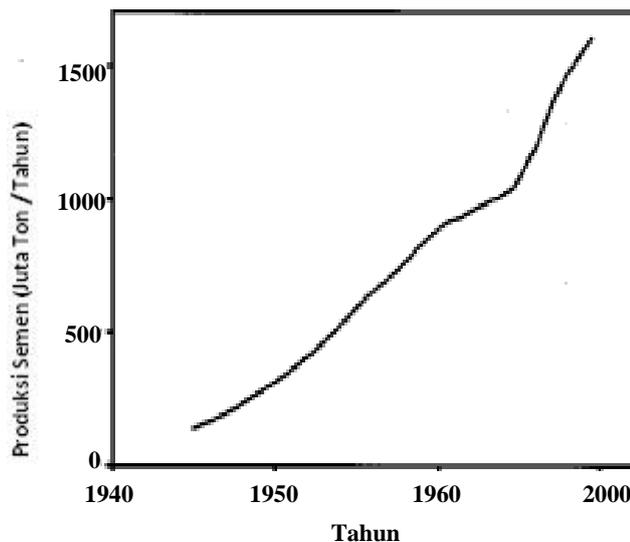
Gambar 2-5. Ternary Diagram (Bentur, 2002)

Gambar 2-6. adalah foto *scanning microscopy* dari Portland semen yang menunjukkan sifat fisik dari semen Portland (Bentur, 2002). Pada zaman dahulu material semen adalah kapur saja atau campuran kapur dengan pozolan alam, dan juga gypsum (kalsium sulfat) sedangkan pada zaman modern, material semen sebagian besar adalah semen Portland.



**Gambar 2-6.** Semen Portland (Bentur, 2002)

Pada awalnya, penggunaan semen hanya berdasarkan tradisi dan pengalaman peradaban manusia, namun kemudian terjadi peningkatan yang luar biasa seiring dengan berkembangnya teknologi dan kebutuhan akan infrastruktur dari manusia, sebagaimana dapat kita lihat pada Gambar 2-7 (Bentur, 2002).



**Gambar 2-7.** Grafik perkembangan penggunaan semen (Bentur, 2002)

Kecenderungan pada saat ini dan nanti adalah peningkatan penggunaan kombinasi antara semen Portland dengan sebagian besar mineral tambahan seperti *slag* dan *fly ash*. Perkembangan penggunaan semen mempunyai catatan sejarah yang panjang. Di abad terakhir ini telah terjadi lompatan besar secara teknologi dari material semen, berdasarkan hubungan yang unik antara ilmu pengetahuan dan rekayasa teknik.

Dewasa ini dampak dari pertimbangan-pertimbangan kelestarian lingkungan telah mempengaruhi penggunaan semen dalam konstruksi yaitu dengan meningkatnya penggunaan material limbah industri dan material daur ulang. Jika ingin mencapai perubahan yang drastis dalam penggunaan material semen, karena adanya pertimbangan-pertimbangan kelestarian lingkungan, maka satu hal yang harus dipertimbangkan adalah merubah total cara pandang dalam menggunakan material semen untuk kebutuhan pembangunan struktur konstruksi, yaitu dengan cara mengembangkan material dan model konstruksi yang secara drastis dapat mengurangi jumlah penggunaan material semen tanpa mengakibatkan pengurangan kinerja struktural (Bentur, 2002).

Proses hidrasi dari campuran semen merupakan faktor penting yang menentukan pada perubahan sifat fisik dan teknis dari material. Perubahan ini terwujud dari adanya pembentukan sementasi material selama proses hidrasi. Ikatan yang kuat antara partikel secara terus menerus membentuk suatu rangkaian yang keras dan selanjutnya menjadi material yang kuat dan permanen. Selain untuk menambah kekuatan campuran, semen berfungsi pula untuk menurunkan nilai index plastis (PI) suatu campuran. Material berbutir dengan index plastis maksimum (PI) 12%, bergradasi baik dan mengandung fraksi halus yaitu < 25% lolos saringan no. 200 (0,075 mm) dengan batas cair (LL) maksimum 40%, akan sangat baik bila distabilisasikan dengan semen sebagaimana yang disyaratkan dalam *Standard Recommended Practice for Stabilization of Subgrade and Base Materials* (AASHTO, 2008).

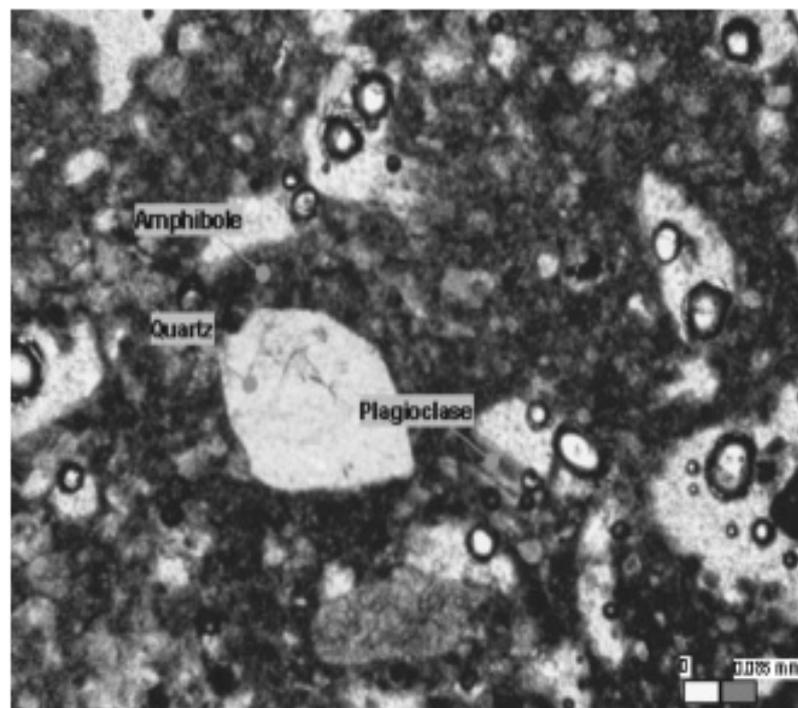
### **2.2.3.3 Tras (Pozolan Alam)**

Tras adalah material pozolan. Material pozolan dapat berupa pozolan alam yaitu berupa hasil pelapukan abu vulkanik dari erupsi gunung berapi dan pozolan buatan yaitu dari hasil sisa buangan industri seperti batu bara atau produk sisa pabrikasi bahan pertanian. Material ini mengandung unsur silika dan atau aluminat yang reaktif (ASTM, 1993 dan ACI, 2001). Dalam keadaan halus (lolos saringan 0.21 mm) dapat bereaksi dengan air dan kapur padam pada suhu normal (24-27<sup>0</sup>C) menjadi suatu massa padat yang tidak larut dalam air. Material pozolan dapat dibedakan atas 3 klas yaitu :

- 1) Klas N, ialah hasil kalsinasi dari pozolan alam seperti tanah diatomice, shale, tuft dan batu apung.
- 2) Klas F, ialah *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis antrasit pada suhu 1560 °C.
- 3) Klas C, adalah hasil pembakaran lignit atau batu bara dengan kadar karbon berkisar 60%. *Fly ash* ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur diatas 10%.

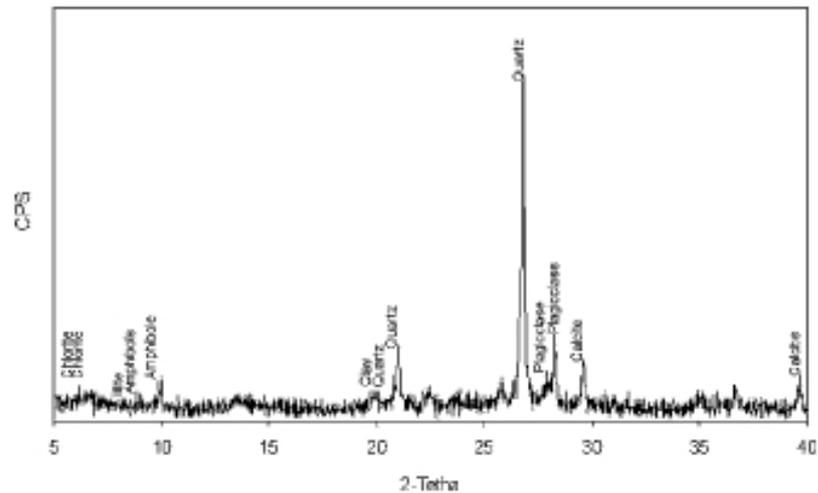
Mehta (1987) mengklasifikasikan pozolan alam dalam 4 katagori berdasarkan prinsip kandungan kapur reaktif yang terkandung di dalamnya, yaitu:

- 1) *Unaltered volcanic glass*
- 2) *Volcanic tuff*
- 3) *Calcined clay* atau *shale*
- 4) *Raw* atau *calcined opaline silica*



**Gambar 2-8.** Potongan Tipis dari Pozolan Alam (Yetgin and Cavdar, 2006)

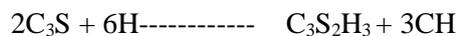
Tras yang digunakan sebagai material substitusi parsial semen adalah pozolan alam yang merupakan hasil pelapukan material letusan gunung berapi seperti halnya tuff dan batu apung, termasuk bahan galian golongan C. Gambar 2-8. adalah foto *scanning electronic* dari material pozolan alam asal Turki yang menunjukkan struktur mikro dan kandungan unsur kimia dari material pozolan alam (Yetgin and Cavdar, 2006) .



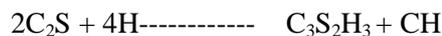
**Gambar 2-9.** XRD dari Pozolan Alam (Yetgin and Cavdar, 2006)

Gambar 2-9. adalah hasil foto X-ray dari pozolan alam asal Turki, yang menunjukkan komposisi unsur-unsur kimia dan jumlah yang terkandung didalamnya (Yetgin and Cavdar, 2006). Mindess and Young (1981) menyatakan bahwa, proses hidrasi semen, *calcium silicatehydrate* ( $C_3S_2H_3$ ) terbentuk dari:

1) *Tricalcium silicate* dengan air sebagai berikut:



2) *Dicalcium silicate* dengan air sebagai berikut:



*Calcium silicate hydrate* ( $C_3S_2H_3$  atau C-S-H) merupakan senyawa yang memperkuat beton, sedangkan kapur mati (CH) adalah senyawa yang poros dan melemahkan beton. Dengan adanya kandungan silica dalam tras diharapkan kapur mati (CH) akan bereaksi dengan silica (S) membentuk *calcium silicate hydrate* ( $C_3S_2H_3$ ) sehingga dapat meningkatkan ikatan antar partikel dalam campuran semen.

Menurut ASTM (1993) material dengan komposisi kimia  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , dan  $Al_2O_3$  lebih besar dari 70% dapat digunakan sebagai mineral tambahan pada campuran semen. Dari hasil pengujian komposisi kimia, tras mengandung  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  dan  $Al_2O_3$  sebanyak 88,77% dan unsur silica ( $SiO_2$ ) memberikan bobot persentasi yang sangat dominan. Hal ini menunjukkan bahwa tras dapat digunakan sebagai material substitusi parsial semen (Tanudjaya et al., 2000).

Penyebaran tras di Indonesia mengikuti jalur rangkaian gunung api Tersier dan Kuartar antara lain (<http://miner-padang.blogspot.com/2011/12/bahan-galian-industri-yang-berkaitan.html>) :

1) Nanggroe Aceh Darussalam : Ujung Batu dan Krueng Raya, Kab. Aceh besar, Gronggong Kab. Aceh Pidie, Takengon Kec. Takengon Kab, Aceh Tengah

- 2) Sumatera Utara : Sarula Kab. Tapanuli Utara
- 3) Sumatera Barat : Muaro Labuah Kab. Solok Selatan, Kota Padang Panjang, Matur dan Gadut Kab. Agam, Bonjol Kab. Pasaman
- 4) Jambi : P. Pandan dan Batuputih Kec. Danau Kerinci Kab, Kerinci, Kampai Bukit Limon, Selai Pulau Tengah dan Batu Putih
- 5) Bengkulu : Jambu Keling, Kotadonok, Tanjung Panai Kec. Padang Ulaktanding, Lubuk Tanjung Kec. Kerapak, Kepahiang dekat perbatasan dengan Sumatera Barat
- 6) Lampung : Mutaralam Kec. Sumberjaya Kab. Lampung Utara
- 7) Jawa Barat : Ciomas Kab. Serang, Batu Reog dan Bongkor, Kec. Lembang Kab. Bandung, Cicurug Kab. Sukabumi, Sulukuning Kab. Purwakarta, Nagreg Ka. Bandung, Cimeong, Sukaesmi Kec. Maja Kab. Majalengka, Sukamelang Kec. Kedipaten Kab. Majalengka, Sukaraja, Maruyung dan Cikancung Kab. Bandung, Cikalong Wetan Kab. Bandung, Nyalindung, Padalarang Kab. Bandung, Batu jajar Kec. Cililing Kab. Bandung, Bobos dan Loji Kec. Sumber Kab. Cirebon, Gekbrog Kec. Warungkondang Kab. Cianjur
- 8) Jawa Tengah : Kalirejo Kec. Unggaran Kab. Semarang, Pudak Payung Kec. Ungaran Kab. Semarang, Lajan Kec. Sumowono, Bandungan Kec. Ambarawa, Kragilan Kec. Mojosoongo Kab. Boyolali, Kaligesing Kab. Purworejo, Gn. Muria Kab. Pati, Kendel Kec. Kemusu Kab. Boyolali, Jatinom Kec, Jatinom, Klaten, Towel Kab. Tegal, Badungan Kab. Magelang, Samigaluh, Kulon Progo DIY, Wonogiri Kab. Wonogiri, Rembang Kab. Probolinggo.
- 9) Jawa Timur : Batu Malang, Kec. Pujon Kab, Malang, Sumberbrantas Kec. Batu Kab. Malang, Punten Kec. Batu Malang, Turan Kab. Malang, Jari Kec. Bubukan Kab. Bojonegoro, Gn. Kelud, Pacet Kec. Pacet Mojokerto, Made Kec. Pacet Kab. Mojokerto, Singgahan, Pulung Kab. Ponorogo, Puger Kab. Trenggalek, Panarukan Situbondo, Pandak, Parseh, Tegalampel, Bondowoso
- 10) Bali : Bajar males dan Batujulung Kec. Kuta Kab. Badung, Marga Kab. Tabanan, Bringkit Kab. Badung, Samplangan, Gua Gajah, Bunitan Kab. Gianyar, Bukit ambul Kab. Klungkung, Banjar Wanyu Kec. Marga, Tabanan
- 11) NTB : Tanah beak Kab. Lombok Barat
- 12) NTT : Waipors Kec. Bola Kab. Sikka, Maumere Kab. Sikka, Waulupang Kab. Flores Timur, Lawoleba, P. Lembata, Rainimi dan Atambua Kab. Kupang.
- 13) Sulawesi Utara : Pineleng Kec. Pineleng Kab. Minahasa, Matani, Kec. Tomohon Kota Tomohon, Lolak, Kab. Bolaang Mongondow.

14) Sulawesi Selatan : Bukit Lakapala Kec. Malusetasi Kab. Barru Malino Kec. Tinggimoncong, Kab. Gowa

Tabel 2.4 menunjukkan komposisi kimia dari tras yang berasal dari Minahasa, Sulawesi Utara (Tanudjaya et al., 2000) dan Tras yang berasal dari Turki (Yetgin and Cavdar, 2006) dimana jenis unsur kimia yang terkandung di dalamnya sama, sekalipun jumlah kandungannya sedikit berbeda. Sedangkan Tabel 2.5 adalah standar spesifikasi material pozolan untuk dapat digunakan sebagai mineral tambahan atau substitusi parsial semen menurut ASTM.

**Tabel 2.4.** Komposisi Kimia Tras (Natural Pozolan-Turki dan dari Minahasa) (Yetgin and Cavdar, 2006; Tanudjaya et al., 2000)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
Natural Pozolan (Turki)	70,89	9,08	2,96	5,40	0,62	-	7,23	1,11	1,92	99,21
Tras (Minahasa)	69,99	18,61	0,17	7,06	3,16	-		0,21		

**Tabel 2.5.** Standard Specification for Fly Ash and Pozzolanic Materials (ASTM C618-93)

	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO %	SO <sub>3</sub> %	Los in ignition %	7 <sup>th</sup> Day Flexural strength (MPa)	7 <sup>th</sup> Day compressive strength (MPa)
TS 25	>70.00	<5.00	<3.00	<10.00	>1.00	>4.00
Natural Pozolan	82.93	0.62	-	7.23	4.45	11.00

Selain kandungan unsur silica, pengaruh penambahan tras dalam campuran semen juga ditentukan oleh kehalusan dari partikel tras, semakin halus tras semakin baik pengaruhnya terhadap kekuatan campuran. Oleh karena itu bongkahan tras yang akan digunakan harus dihancurkan dan dihaluskan. Sebelum diayak, tras harus dikeringkan (dengan matahari) selama ± 2 hari untuk mengurangi kadar air dari tras hingga mencapai kira-kira 0,5%. Proses penghalusan dan pengayakan dilakukan untuk mendapatkan kehalusan dari tras, dimana kehalusannya akan menentukan *specific gravity* (Gs) dari tras. *Specific gravity* yang besar akan meningkatkan kekuatan campuran karena selain ukuran butir yang semakin halus, juga adanya pori-pori dalam partikel tras semakin berkurang karena proses penghancuran (Kiattikomol et al., 2001 dan Paya et al., 1997).

AASHTO, 93 menyatakan baik *shrinkage* maupun *strength* dari campuran beton atau semen sangat dipengaruhi oleh ratio antara semen-air. Semakin bertambah air dalam campuran, potensi terjadinya *shrinkage* akan meningkat dan akan menurunkan kekuatan dari campuran. Oleh karena itu, *shrinkage* secara proporsional dianggap berbanding terbalik dengan *strength* dari campuran. Tabel 2.6. adalah tabel yang menyatakan korelasi antara *Indirect Tensile Strength* (ITS) dengan *shrinkage* yang terjadi dan dapat digunakan sebagai penuntun untuk perencanaan campuran semen (AASHTO,1993). Semakin besar nilai ITS semakin kecil kemungkinan susut yang akan terjadi sehingga memperkecil retak akibat susut (*shrinkage cracking*) yang dapat terjadi. Peningkatan ketahanan terhadap retak akibat susut ini dapat dilakukan dengan penambahan material pozolan kedalam campuran semen (Indrawati and Manaf, 2011; Elfert, 74; ACI,96)

**Tabel 2.6.** Perkiraan Hubungan antara Susut dan ITS pada campuran semen (AASHTO,1993)

<b>ITS (psi)</b>	<b>Susut (inch/inch)</b>
≤ 300	0,00080
400	0,00060
500	0,00045
600	0,00030
≥ 700	0,00020

Dari studi kepustakaan yang telah dilakukan terhadap beberapa catatan hasil penelitian dan landasan teori yang telah ditulis diatas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan material RAP dan RAM untuk dimanfaatkan kembali pada konstruksi perkerasan jalan, sangat bermanfaat, karena dapat mengurangi penggunaan energi, sumber daya alam baru (aspal, dan agregat) serta mengurangi bertumpuknya sampah padat bekas konstruksi perkerasan jalan. Namun karena kurangnya karakteristik mekanis dari material ini maka perlu adanya penambahan mineral atau aditif tertentu untuk meningkatkan karakteristik mekanis dari campuran tersebut. Penambahan semen pada campuran RAP dan RAM akan meningkatkan karakteristik mekanik dan karakteristik kimia campuran tersebut.

Namun demikian, campuran ini memiliki beberapa kelemahan. Oleh karena itu perlu adanya penambahan material lain selain semen untuk dapat menyempurnakan kinerja campuran tersebut. Penambahan material pozolan untuk substitusi parsial semen pada campuran RAP dan RAM diharapkan akan membantu memperbaiki karakteristik fisik serta meningkatkan karakteristik mekanik dari campuran CTRB, sebagaimana yang ditunjukkan dari beberapa hasil penelitian terhadap campuran yang distabilisasi dengan semen dan disubstitusi parsial dengan *fly ash* atau material pozolan lainnya.

Oleh karena penggunaan material CTRB yang sebagian material semennya disubstitusi dengan tras (dalam aplikasi perkerasan jalan) belum pernah dilakukan, maka efisiensi jumlah semen yang disubstitusi dengan tras yang menghasilkan kekuatan optimum dari campuran belum diketahui. Oleh karena itu perlu adanya penelitian untuk mengetahui dan mengembangkan persamaan empiris untuk menentukan dosis yang tepat serta memprediksikan kekuatan campuran CTRB yang disubstitusi parsial dengan tras, sebagaimana yang telah dilakukan pada campuran stabilisasi tanah dengan semen dan *fly ash* (Jongpradist et al., 2010; Lorenzo and Bergado, 2006), dimana kekuatan dari campuran (UCS,  $q_u$ ) dihitung dengan memasukan variabel kadar rongga dalam campuran ( $\eta$ ), variabel kadar material semen dalam campuran ( $c_{iv}$ ), variabel ratio kadar rongga terhadap kadar semen ( $\eta/c_{iv}$ ) dan waktu perawatan ( $t$ ) serta faktor efisiensi penggunaan semen dan tras sebagai variabel-variabel yang menentukan kekuatan campuran.

Untuk itu, karakteristik kekuatan campuran dan variabel-variabel yang mempengaruhi kekuatan campuran perlu diketahui dan diteliti terlebih dahulu, untuk melihat berapa besar pengaruh variabel-variabel tersebut terhadap kekuatan campuran (karena pengaruh dari material pozolan alam dalam campuran) dan hubungannya dengan variabel-variabel yang ada.

### **2.3. Analisis Kekuatan Campuran**

Perkiraan kekuatan campuran ( $q$  ultimate) dengan tingkat keakuratan yang rasional adalah suatu hal yang penting untuk perencanaan awal campuran semen dan analisis biaya konstruksi. Berbagai penelitian stabilisasi tanah telah dilakukan untuk menentukan hal ini, dimana semua pendekatan dilakukan berdasarkan pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS). *Compressive strength* adalah sifat penting dari suatu campuran semen atau beton yang bukan saja menyatakan mutu dari campuran tetapi juga merupakan dasar yang penting untuk perencanaan struktur (Cheng, et al., 2008). Berbagai variabel yang mempengaruhi kekuatan campuran adalah dikorelasikan terhadap *Compressive strength* dari campuran.

Untuk campuran stabilisasi tanah dengan semen pada kondisi jenuh air, parameter yang dianggap menentukan kekuatan campuran adalah kadar air ( $W$ ) dan kadar semen ( $c_{iv}$ ) dalam campuran sebagaimana berlaku untuk campuran beton pada umumnya, yaitu mengikuti Hukum Abrams (Abrams, 1919), serta ratio antara kedua parameter tersebut dan kadar rongga udara setelah waktu perawatan ( $e_{ot}$ ) (Jongpradist et al., 2010; Lorenzo and Bergado, 2006). Sedangkan untuk stabilisasi tanah dengan semen pada kondisi tanah yang tidak jenuh air, parameter yang menentukan untuk mencapai kekuatan campuran adalah

kadar rongga udara ( $\eta$ ) dan kadar semen ( $c_{iv}$ ) dalam campuran serta ratio dari kedua parameter ini (Consoli et al., 2011; Fonseca et al., 2009).

Perhitungan kekuatan campuran  $q_u$  dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.1). Persamaan ini adalah untuk menghitung kekuatan campuran stabilisasi tanah dengan semen, tanpa penambahan material pozolan yang dikembangkan oleh Consoli et al. (2011) sebagai berikut:

$$q_u \text{ (kPa)} = 11,538 (t)^{0,37} (\eta/C_{iv})^{-1,2} \quad (2.1)$$

dengan:

$q_u$  = UCS = Kekuatan campuran (kPa)

$t$  = Waktu perawatan (hari)

$\eta$  = Kadar Rongga dalam campuran (%)

$C_{iv}$  = Jumlah kadar semen dalam campuran (%)

Untuk campuran semen dimana sebagian semennya disubstitusi parsial dengan material pozolan, maka jumlah kadar semen dalam campuran ( $C_{iv}$ ) harus dihitung dengan memasukan jumlah material pozolan yang ditambahkan dalam campuran, yaitu dengan menggunakan persamaan jumlah kadar material semen ekuivalen dalam campuran ( $C_{iv}^*$ ) seperti yang dinyatakan dalam Persamaan (2.2) di bawah ini (Papadakis and Tsimas, 2002):

$$C_{iv}^* = C_{iv} + \alpha Fw \quad (2.2)$$

dengan:

$C_{iv}^*$  = Jumlah kadar material semen ekuivalen dalam campuran ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_{iv}$  = Jumlah kadar semen dalam campuran ( $\text{kg/m}^3$ )

$Fw$  = Jumlah kadar tras dalam campuran ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\alpha$  = Faktor efisiensi tras yang akan ditambahkan sebagai substitusi parsial semen yang adalah fungsi dari komposisi kimia dan gradasi tras.

Untuk menghitung  $\alpha$  digunakan persamaan empiris untuk perhitungan kekuatan campuran beton yaitu persamaan yang telah dimodifikasi oleh Papadakis dan Tsimas (2002) sebagaimana tertulis pada Persamaan (2.3), hal ini dilakukan karena mekanisme pencapaian kekuatan campuran CTRB dianggap sama dengan mekanisme pencapaian kekuatan pada campuran beton, seperti yang dilakukan oleh Jongpradish et al. (2010) untuk stabilisasi tanah lempung dengan semen yaitu:

$$f'_{(c)} = K \left[ \frac{1}{W/(c_{iv} + \alpha F_w)} - a \right] \quad (2.3)$$

dengan:

$f'_{(c)}$  = Kekuatan tekan campuran atau UCS (MPa)

$a$  = Parameter yang berhubungan dengan waktu perawatan campuran (dihitung dengan perhitungan balik dari hasil pengujian UCS yang diperoleh)

$K$  = Parameter yang berhubungan tipe semen (MPa) (dihitung dari slope persamaan hubungan antara *Unconfined Compressive Strength* dengan rasio antara kadar semen dan kadar air ( $c_{iv}/w$ ))

$W$  = Jumlah air total dalam campuran ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$C_{iv}$  = Jumlah semen dalam campuran ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$F_w$  = Jumlah tras dalam campuran ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )

$\alpha$  = Faktor efisiensi kadar tras yang akan ditambahkan sebagai substitusi parsial dari semen

Untuk menghitung nilai  $a$  dan  $K$  dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2.4), yaitu persamaan untuk menentukan kekuatan campuran semen tanpa penambahan tras sebagai berikut (Papdakis and Tsimas, 2000):

$$f'_{(c)} = K \left( \frac{1}{W/C} - a \right) \quad (2.4)$$

Untuk menghitung besarnya faktor efisiensi tras ( $\alpha$ ), dilakukan dengan memasukkan nilai kekuatan campuran  $f'_{(c)}$ , nilai  $K$  dan  $a$  yang diperoleh kedalam Persamaan (2.5) yaitu analogi dari Persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{\left\{ \left[ \frac{f'_{(c)}}{K} + a \right] W \right\} - c_{iv}}{F_w} \quad (2.5)$$

Untuk menentukan kadar pori dalam campuran ( $\eta$ ) digunakan rumus pada Persamaan 2.6. yaitu rumus untuk menentukan pori dalam campuran yang dikembangkan oleh Consoli et al. (2011) untuk campuran tanah yang distabilisasi dengan semen sebagai berikut:

$$\eta = 100 - 100 \left[ \left( \frac{\frac{\gamma_d V_s}{1 + \frac{c}{100}}}{G_{s_s}} \right) + \left( \frac{\frac{\gamma_d V_s}{1 + \frac{c}{100}} \cdot X \cdot \frac{c}{100}}{G_{s_c}} \right) \right] / V_s \quad (2.6)$$

dengan:

$\gamma_d$  = Kepadatan dan kering ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$V_s$  = Volume total RAP dan RAM ( $\text{cm}^3$ )

- C = Kadar semen dalam Campuran ( $C_{iv}$ ) (%)  
 $G_{S_s}$  = Berat jenis RAP dan RAM  
 $G_{S_c}$  = Berat jenis semen

Untuk menghitung tebal perkerasan jalan, digunakan Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan metode Analisa Komponen dari Bina Marga (SNI 03-1732-1989). Perhitungan perencanaan ini didasarkan pada kekuatan relatif masing-masing lapisan perkerasan jangka panjang, dimana penentuan tebal perkerasan dinyatakan oleh ITP (Indeks Tebal Perkerasan), sebagaimana tertulis pada Persamaan (2.7) di bawah ini:

$$ITP = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (2.7)$$

dengan:

- $a_1, a_2, a_3$  = Koefisien kekuatan relatif bahan perkerasan  
 $D_1, D_2, D_3$  = Tebal masing-masing lapis perkerasan (cm)

## 2.4. Kerangka Pikir

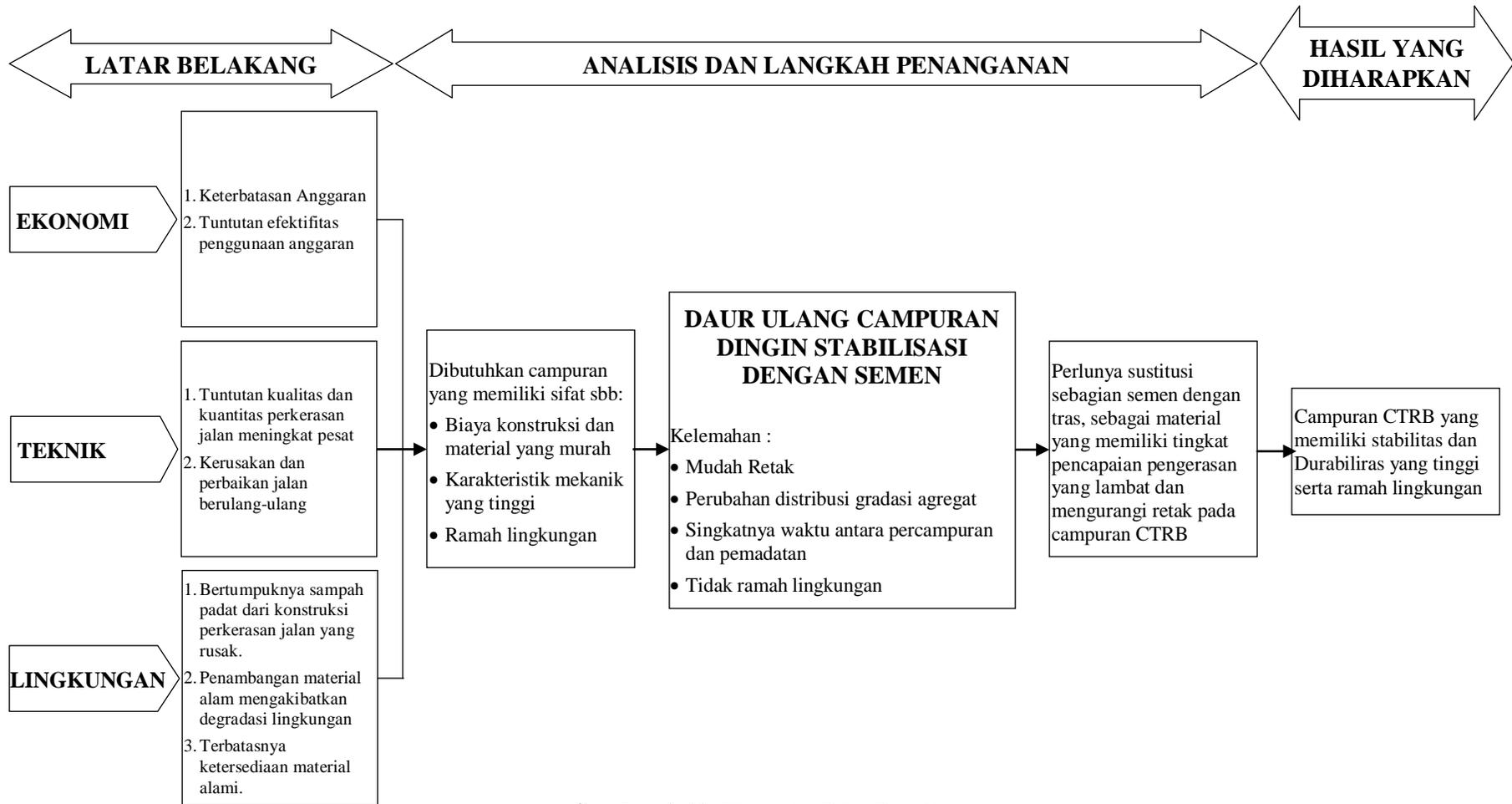
Kerangka pikir yang mendasari penelitian ini adalah merupakan latar belakang mengapa penelitian ini perlu dilakukan yakni meliputi berbagai permasalahan yang berhubungan dengan pembangunan jaringan jalan baru dan rehabilitasi jalan lama dalam hal ini mengenai campuran konstruksi perkerasan jalan. Masalah keterbatasan biaya dan material hingga permasalahan lingkungan, menjadi kendala dalam menyediakan jaringan jalan yang handal bagi kebutuhan masyarakat. Tujuan diadakannya penelitian ini adalah untuk mengembangkan teknik campuran perkerasan jalan yang dapat mengeliminasi berbagai permasalahan yang ada sehingga pembangunan konstruksi perkerasan jalan dapat dilakukan seefisien dan efektif mungkin. Cara-cara yang akan dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian serta hasil dan keluaran yang akan diperoleh semuanya dituangkan dalam bentuk bagan alir, seperti yang digambarkan pada Gambar 2-10.

Tabel 2.7. adalah beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti terdahulu tentang campuran daur ulang lapis pondasi tanpa bahan stabilisasi dan campuran daur ulang lapis pondasi yang distabilisasi dengan semen (CTRB) maupun campuran daur ulang lapis pondasi yang distabilisasi dengan material pozolan buatan (*fly ash* dan *cement fiber*) dan campuran stabilisasi tanah yang menggunakan semen dan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi. Dalam Tabel ini, diuraikan tentang maksud pengujian, variabel yang dicari, cara pengujian, dan hasil yang diperoleh dalam pengujian.

Dari beberapa penelitian tentang campuran daur ulang perkerasan jalan yang distabilisasi dengan semen khususnya lapis pondasi (CTRB), didapati bahwa penambahan

atau substitusi parsial semen dengan material tras (pozolan alam) belum pernah diteliti. Namun demikian, penelitian tentang stabilisasi tanah dengan semen yang disubstitusi parsial dengan pozolan alam maupun buatan (*Fly ash*, dll) telah banyak dilakukan. Penelitian-penelitian sebelumnya tentang campuran RAP dan RAM yang distabilisasi dengan semen menunjukkan adanya beberapa kelemahan pada campuran CTRB, diantaranya adalah kecenderungan retak dan terbatasnya waktu antara pencampuran dan pengerasan campuran sehingga berpengaruh buruk terhadap workabilitas campuran ini.

Sementara stabilisasi RAP dan RAM untuk lapis pondasi perkerasan jalan dengan menggunakan material pozolan buatan (*fly ash*) sebagai bahan stabilisasi, sekalipun menunjukkan adanya peningkatan kekuatan namun dibandingkannya dengan stabilisasi dengan semen pencapaian kekuatannya rendah. Adapun penambahan tras (pozolan alam) dan *fly ash*, *ground granulated blast furnance slag*, *electric arc furnance slag* atau *rice husk ash* dan *palm oil fuel ash* (pozolan buatan) dalam campuran beton maupun stabilisasi tanah dengan semen menunjukkan adanya pengaruh yang baik dari material pozolan terhadap kinerja campuran. Oleh karena itu perlu adanya penelitian mengenai campuran CTRB dimana sebagian material semennya disubstitusi parsial dengan material tras (pozolan alam) untuk memperoleh campuran yang kuat dan memiliki durabilitas serta workabilitas yang tinggi.



Gambar 2-10. Kerangka Pikir Penelitian

**Tabel 2.7.** Mapping Hasil Penelitian Terdahulu Tentang Campuran CTRB dan Campuran Stabilisasi Tanah dengan Semen dan *Fly Ash*

<b>MATERIAL</b> \ <b>METODE</b>	<b>EMPIRIS</b>	<b>MEKANIS</b>	<b>HASIL</b>
RAP tanpa bahan stabilisasi (Epps et al., 1978)		UCS Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Data laboratorium tidak sesuai dengan data di lapangan</li> <li>• Keseragaman dan karakteristik material menjadi masalah dalam penggunaan RAP</li> </ul>
RAP yang distabilisasi dengan semen (Brown et al., 2006)		UCS TST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jika kadar RAP meningkat, UCS menurun, dan jika semen meningkat UCS meningkat</li> <li>• Dielektrik akhir meningkat jika kadar RAP menurun dan sebaliknya Final Dielektrik menurun, jika RAP meningkat. Jika kadar semen meningkat, Final Dielektrik menurun.</li> </ul>
RAP yang distabilisasi dengan semen dan semen fiber (Potturi, 2006)		Triaxial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campuran RAP tanpa bahan stabilisasi menghasilkan nilai <math>M_R</math> sebesar 180-340 MPa sedangkan campuran RAP dan agregat dengan bahan stabilisasi semen dan semen fiber menghasilkan nilai <math>M_R</math> sebesar 200-500 MPa</li> <li>• Confining dan Deviatoris stresses menunjukkan pengaruh yang besar terhadap nilai modulus resilien dari campuran yang distabilisasi dengan semen dan semen fiber maupun campuran tanpa bahan stabilisasi.</li> </ul>
RAP tanpa bahan stabilisasi (Kim et al., 2007)		Triaxial Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pada <math>OMC &lt; 100\%</math> camp RAP kaku</li> <li>• Camp dengan kadar RAP displacementnya &gt;&gt; dibandingkan dengan camp 100% agregat</li> </ul>
RAP tanpa bahan stabilisasi (Guthrie et al., 2007)		CBR Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penambahan kadar RAP 25-50% meningkatkan kerentanan terhadap kelembaban dibandingkan dengan camp tanpa RAP</li> <li>• Penambahan kadar RAP mengakibatkan menurunnya nilai CBR</li> <li>• Kadar RAP 0-25% daya dukung menurun pada OMC sedangkan Pada kadar RAP 25-100% daya dukung meningkat pada OMC</li> </ul>

**Tabel 2.7.** Mapping Hasil Penelitian Terdahulu Tentang Campuran CTRB dan Campuran Stabilisasi Tanah dengan Semen dan *Fly Ash* (Lanjutan)

<b>MATERIAL</b> \ <b>METODE</b>	<b>EMPIRIS</b>	<b>MEKANIS</b>	<b>HASIL</b>
RAP yang distabilisasi dengan semen utk Full-depth-reclamation (Miller et al., 2007)	FWD	UCS dan TST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penambahan semen meningkatkan kekuatan dan durabilitas CTRB</li> <li>• Early Traffic mengakibatkan pengurangan kekuatan awal campuran.</li> </ul>
RAP yang distabilisasi dengan bahan kimia (Gane, 2009)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• UCS Test</li> <li>• Wetting/Drying test</li> <li>• SEM dan XRD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hasil pengujian UCS setelah siklus wetting/drying menunjukkan tidak menunjukkan ada perubahan volume yang signifikan dari campuran.</li> <li>• Pengujian Xray dan SEM menunjukkan adanya pembentukan senyawa pozolanic yang penting.</li> </ul>
Stabilisasi Tanah Lempung dengan semen dan fly ash (Jongpradist et al., 2010)		UCS Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekuatan campuran semen dan fly ash untuk stabilisasi tanah lempung yang jenuh air bertambah dengan meningkatnya meterial semen dan durasi <i>curing time</i>, sebaliknya menurun dengan meningkatnya kadar air dalam campuran.</li> <li>• Efisiensi penambahan fly ash dalam campuran tanah lempung dan semen tergantung pada kadar semen dalam campuran.</li> <li>• Untuk memperkirakan kekuatan campuran ini konsep kadar semen ekwivalen (<math>A_w^*</math>) yang berhubungan dengan faktor efisiensi (<math>\alpha</math>) dapat dikembangkan dengan baik.</li> </ul>
RAP yang distabilisasi dengan semen (Puppala et al., 2011)		Triaxial Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>M_R</math> dari camp RAP yang distabilisasi &gt;&gt; dari camp tanpa bahan stabilisasi</li> <li>• Koef Struktural (<math>a</math>) adalah 0,16-0,22 untuk camp dengan bahan stabilisasi.</li> </ul>
RAP yang distabilisasi dengan semen dan RAP yang distabilisasi dengan fly ash (Yuan et al., 2011)		UC, ITS dan FFRC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nilai Dielektrik &lt;10 untuk semua kombinasi camp RAP dengan semen</li> <li>• Nilai UCS 300psi dapat diperoleh dengan kadar semen 4, 3, dan 2% pada kadar RAP 100, 75 dan 50%</li> <li>• Hasil pengujian UCS, ITS dan FFRC cukup konsisten yaitu 300 psi, 40 psi dan 1000 ksi.</li> </ul>

**Tabel 2.7.** Mapping Hasil Penelitian Terdahulu Tentang Campuran CTRB dan Campuran Stabilisasi Tanah dengan Semen dan *Fly Ash* (Lanjutan)

MATERIAL \ METODE	EMPIRIS	MEKANIS	HASIL
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Persentase partikel halus dalam RAP tidak berpengaruh signifikan pada kekuatan dan modulus resilient camp RAP dan semen.</li> <li>• Gradasi agregat kasar hanya berpengaruh sedikit pada kekuatan dan <math>M_R</math> campuran</li> <li>• Perubahan volumetrik sebesar 1% terjadi pada camp 75% RAP dengan kadar semen 2 dan 4%, diikuti dengan camp 50% RAP dengan kadar semen 2 dan 4% dan terakhir adalah camp 100% RAP dengan kadar semen 4-6%</li> <li>• Camp dengan kadar RAP 75% dengan kadar semen 2-4% menghasilkan UCS terbaik setelah pengukuran Leachate</li> <li>• Hasil pengujian SEM dan XRD menunjukkan penambahan kekuatan dengan stabilisasi semen</li> </ul>
Campuran RAP + Semen dan RAP + Semen Fiber (Hoyos et al., 2011)		UCS Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulic Conductivity campuran RAP + Semen + Fiber lebih tinggi dari campuran RAP tanpa stabilisasi</li> <li>• UCS dari semen + Fiber + RAP pada kadar semen 4-6% sama dengan campuran daur ulang beton.</li> <li>• Kekuatan campuran meningkat seiring dengan bertambahnya kadar semen.</li> </ul>
Campuran RAP dengan semen dan Campuran RAP dengan Cement Kiln Dust (CKD) (Ebrahimi et al, 2011)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seismic Wave Test</li> <li>• Bench-scale Resilient Modulus Test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilisasi material daur ulang dengan CKD meningkatkan modulus resilien campuran 5-30X tergantung pada kadar CKD dan jenis material daur ulang, namun tidak sebesar modulus resilien dari material yang distabilisasi dengan semen.</li> </ul>

**Tabel 2.7.** Mapping Hasil Penelitian Terdahulu Tentang Campuran CTRB dan Campuran Stabilisasi Tanah dengan Semen dan *Fly Ash* (Lanjutan)

<b>MATERIAL</b> / <b>METODE</b>	<b>EMPIRIS</b>	<b>MEKANIS</b>	<b>HASIL</b>
Stabilisasi tanah berpasir dengan semen (Consoli et al., 2011)		UCS Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rasio rongga udara – kadar semen (<math>n/C_v</math>) merupakan parameter yang menentukan untuk kekuatan campuran (UCS) pada stabilisasi tanah pasir dengan semen</li> <li>• Berdasarkan persamaan kadar campuran yang diperoleh dari penelitian ini, ada beberapa cara untuk mendapatkan kekuatan yang ditargetkan tergantung dari waktu pemeraman, pemadatan dan kadar semen.</li> </ul>
Stabilisasi tanah lempung dengan semen (Consoli et al., 2011)		UCS Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berdasarkan kriteria yang rasional (menggunakan rasio antara kadar rongga dan kadar semen) menunjukkan peranan utama dalam mencapai kekuatan yang ditargetkan dari campuran tanah lempung.</li> <li>• Hasil penelitian menunjukkan tanah lempung yang lebih halus mencapai kekuatan lebih tinggi dibandingkan dengan tanah lempung yang lebih kasar.</li> <li>• Berdasarkan persamaan kadar campuran yang diperoleh dari penelitian ini, ada beberapa cara untuk mendapatkan kekuatan yang ditargetkan tergantung dari waktu pemeraman, pemadatan dan kadar semen.</li> </ul>
Campuran CTRB yang distabilisasi dengan semen dan tras (Joice E. Waani)		UCS, ITS, CBR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menghitung pengaruh substitusi parsial material tras (Pozzolan) terhadap semen dalam meningkatkan kekuatan campuran CTRB</li> <li>• Mendapatkan persamaan empiris faktor efisiensi penambahan tras dalam campuran</li> <li>• Mendapatkan persamaan empiris tentang perkiraan kekuatan campuran.</li> </ul>

## 2.5. Pendekatan Metode Analisis Data

### 2.5.1. Analisis Regresi

Analisis Regresi adalah suatu analisis untuk mengukur pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Ada beberapa bentuk Persamaan Regresi seperti yang tertulis di bawah ini, yaitu Persamaan (2.8) Persamaan (2.12) dan Persamaan (2.16).

#### 1) Trend Linier

Bentuk umum:

$$Y = a + b(X) \quad (2.8)$$

dengan:

a dan b = Koefisien regresi lihat Persamaan (2.9) dan Persamaan (2.10)

X = Variabel bebas

Y = Variabel terikat

Rumus untuk menghitung a dan b:

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (2.9)$$

$$b = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (2.10)$$

Rumus untuk menghitung koefisien korelasi:

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{\{n(\sum X^2) - (\sum X)^2\}\{n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2\}}} \quad (2.11)$$

dengan:  $-1 \leq r \leq 1$

#### 2) Trend Logaritma

Bentuk umum:

$$Y = a + b \cdot \ln X \quad (2.12)$$

dengan:

a dan b = Koefisien regresi lihat Persamaan (2.13) dan Persamaan (2.14)

X = Variabel bebas

Y = Variabel terikat

$$a = \frac{\sum Y - b \cdot \sum \ln X}{n} \quad (2.13)$$

$$b = \frac{n(\sum Y) \ln X - (\sum Y) \sum (\ln X)}{n(\sum \ln X^2) - (\sum \ln X)^2} \quad (2.14)$$

Rumus untuk menghitung Koefisien Korelasi:

$$r = \frac{n \sum Y \ln X - \sum \ln X \cdot \sum Y}{\sqrt{\{n \sum (\ln X)^2 - (\sum \ln X)^2\} \{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \quad (2.15)$$

dengan:  $-1 \leq r \leq 1$

### 3) Trend Eksponensial

Bentuk persamaan:

$$Y = a \cdot k^x \quad (2.16)$$

dengan:

a dan k = Bilangan tetap, maka persamaan itu dapat diubah menjadi Persamaan (2.17):

$$Y = a \cdot e^{bx} \quad (2.17)$$

dengan:

e = Bilangan tetap 2.718281828459045

x = Variabel bebas

Y = Variabel terikat

Persamaan ini diubah menjadi Persamaan (2.18):

$$\mathbf{Log Y = Log a + (Log b) x} \quad (2.18)$$

Rumus untuk menghitung a dan b yaitu Persamaan (2.19) dan Persamaan (2.20):

$$\mathbf{Log a = \frac{\sum(Log Y)}{n}} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{Log b = \frac{\sum(Log Y \cdot x)}{\sum x^2}} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.21) adalah Rumus untuk menghitung r :

$$r = \frac{n \cdot \sum (x \cdot \mathbf{Log Y}) - (\sum x) (\sum \mathbf{Log Y})}{\sqrt{[n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2] [n \cdot \sum (\mathbf{Log Y})^2 - (\sum \mathbf{Log Y})^2]}} \quad (2.21)$$

dengan:  $-1 \leq r \leq 1$

### 2.5.2. Analisis of Variance (ANOVA)

Metode *analysis of Variance* (ANOVA) adalah metode yang memungkinkan untuk membandingkan secara simultan populasi berganda terutama ketika populasi diklasifikasikan dalam 2 (dua) faktor dikenal dengan Analisis Varians Dua-Arah, dimana control terhadap probabilita kesalahan tipe 1 (*Type I error*) tetap dilakukan. Kesalahan tipe satu terjadi ketika hipotesa nol ditolak, pada hal kenyataannya benar. Jadi penolakan terhadap hipotesa nol adalah salah. Probabilita dari ketepatan untuk kesalahan tipe 1 dinyatakan dalam notasi  $\alpha$ , yang ditentukan oleh peneliti sebagai batas toleransi dari kesalahan penelitian.

Nilai dari  $\alpha$  dibandingkan terhadap tingkat signifikansi, atau nilai-p, dihitung dari data sampel dengan ANOVA, dimana nilai-p mewakili probabilita dari hasil observasi terhadap sampel lebih bertentangan dengan hipotesa nol dari pada hasil observasi sampel. Ketika nilai-p kurang atau sama dengan  $\alpha$ , hipotesa nol dapat ditolak, dan mengarah pada penerimaan hipotesa alternatif. Namun demikian, ketika nilai-p  $> \alpha$ , maka dapat disimpulkan bahwa tidak cukup bukti untuk menolak hipotesa nol. Dalam penelitian ini analisa akan menggunakan standar nilai  $\alpha = 0,05$ . Pada tingkat ini, hanya 5% kemungkinan kesalahan yang boleh terjadi diantara perlakuan-perlakuan yang berbeda.

Pengujian ANOVA digunakan baik untuk meneliti pengaruh-pengaruh utama dan interaksi yang signifikan sehubungan dengan setiap variabel respons dalam penelitian ini.

Keunggulan dari Analisis Varians Dua-Arah:

- 1) Sampel yang diuji berjumlah sedikit, karena penelitian dilakukan untuk 2 (dua) hal sekaligus.
- 2) Dapat menghilangkan beberapa variabel random, karena beberapa variabel random dapat dijelaskan oleh faktor kedua, jadi kita dapat dengan mudah menentukan perubahan yang signifikan.
- 3) Kita dapat melihat interaksi dari faktor-faktor (Interaksi signifikan berarti pengaruh dari satu variabel tergantung pada level faktor yang lain).

#### 2.5.2.1. Model ANOVA Dua-Arah

Misalkan kita memiliki 2 Faktor yaitu Level a (pertama) dan Level b (kedua), jika kita mengukur r individual untuk setiap kombinasi dari Faktor (n = jumlah data) maka kita mendesain dengan model keseimbangan a\*b. Model matematika dari ANOVA dua-arah adalah seperti pada Persamaan (2.22):

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.22)$$

dengan:

$\mu$  = Rata-rata Besar

$\alpha$  = Efek Faktor

$\beta$  = Efek Faktor

$\gamma$  = Efek Interaksi

$\epsilon$  = Residual

Seandainya model ini untuk membuat prediksi tanpa pengetahuan tentang dua faktor, maka prediksi terbaik adalah  $\mu$ . Jika kita mengetahui tingkatan dari faktor A, kita dapat menentukan prediksinya dengan menambahkan  $\alpha_i$ . Demikian juga pengetahuan tentang tingkatan faktor B atau pengetahuan tentang keduanya menyediakan informasi tambahan untuk dapat memodifikasi prediksi kita. Namun kesalahan bisa terjadi setiap saat karena adanya variabel random, untuk itu ada 3 (tiga) set hipotesa yang perlu diuji yaitu :

- 1)  $H_0$  = Tidak ada pengaruh dari faktor A
- 2)  $H_0$  = Tidak ada pengaruh dari faktor B
- 3)  $H_0$  = Tidak ada pengaruh interaktif

Masing-masing hipotesa ini dapat diuji berdasarkan uji F secara terpisah. Seperti biasanya, kita dapat menggunakan ANOVA dua-arah dengan asumsi distribusi normal dan perbandingan antara standar deviasi kelompok besar dan standar deviasi kelompok kecil adalah  $< 2$

#### 2.5.2.2. Tabel ANOVA Dua-Arah

Bentuk tabel dari a\*b ANOVA dengan dua faktor dimana A (level a) dan B (level b) dengan n = jumlah pengamatan dan r adalah jumlah duplikasi adalah sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2.8:

**Tabel 2.8.** Anova Dua Arah

SUMBER	Df	SS	MS	F	nilai - p
A	a - 1	SSA	MSA	MSA/MSE	
B	b - 1	SSB	MSB	MSB/MSE	
A*B	(a-1)(b-1)	SSAB	MSAB	MSAB/MSE	
Error	n-ab	SSE	MSE		
Total	n-1	SST			

Untuk memudahkan proses analisis hasil penelitian ini, digunakan software SPSS, Minitab dan Marquardt-Levenberg Algoritm khusus untuk regresi non-linier.

## 2.6. Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian adalah sebagai berikut:

- 1) Efisiensi kadar material tras dalam campuran CTRB bergantung pada jumlah kadar semen dalam campuran CTRB dan *pozolanic index* dari tras.
- 2) Variabel Waktu Perawatan (t) dan Ratio perbandingan antara rongga udara dengan kadar semen ekuivalen ( $\eta/C_{iv}^*$ ) dalam campuran adalah variabel-variabel yang menentukan dalam pencapaian kekuatan campuran CTRB yang sebagian semennya disubstitusi dengan tras.
- 3) Persamaan Empiris untuk memprediksi kekuatan campuran CTRB, dengan mengacu pada Persamaan (2.1.) yaitu persamaan untuk memprediksi kekuatan campuran semen yang dikembangkan oleh Consoli et al. (2011), dan dengan menambahkan pengaruh tras dalam persamaan yaitu persamaan material semen ekuivalen ( $C_{iv}^*$ ) maka Persamaan (2.1) menjadi Persamaan (2.23) sebagai berikut:

$$q_u = A (t)^B (\eta/C_{iv}^*)^C \quad (2.23)$$

dengan:

$q_u$  = Kekuatan campuran CTRB [MPa]

t = Waktu perawatan [hari]

$\eta/C_{iv}^*$  = Ratio perbandingan antara kadar rongga udara [%] dengan kadar material semen ekuivalen [ $\text{kg/m}^3$ ] dalam campuran

A,B dan C = Konstanta regresi

$$C_{iv}^* = C_{iv} + \alpha F_w \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{\left\{ \left[ \frac{f'_{(c)}}{K} + a \right] \cdot W \right\} - C_{iv}}{F_w} \quad (2.5)$$