

Pengaruh Penambahan Semen Portland terhadap Kekuatan Agregat Kelas A

Adina Sari Lubis*, Fatma Sari Efani, Muliandi, Ridwan Anas, Irwan Suranta Sembiring,
Derry Wiliyanda Nasution

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 03 Agustus 2026
Revisi Akhir: 22 Oktober 2026
Diterbitkan Online: 31 Oktober 2026

KATA KUNCI

Agregat Kelas A
Semen Portland
Modified Compaction
California Bearing Ratio
Unconfined Compression Strength
SDGs

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 822-9694-0932
E-mail: adina@usu.ac.id

A B S T R A K

Lapis pondasi atas merupakan bagian dari perkerasan jalan yang terletak tepat di bawah lapis permukaan dan berperan besar dalam menentukan kestabilan perkerasan. Lapisan pondasi atas menerima sebagian besar beban dari kendaraan dan mendistribusikannya ke tanah dasar. Besaran nilai daya dukung lapis pondasi atas sangat dipengaruhi oleh besar atau kecilnya nilai CBR pada lapis tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan semen Portland terhadap kekuatan agregat kelas A pada skala laboratorium. Penelitian ini sejalan dengan upaya pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya Tujuan 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), Tujuan 11 (Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan), dan Tujuan 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Semen Portland yang ditambahkan dengan variasi kadar 0%, 2%, 4% dan 6%. Pengujian yang dilakukan meliputi *Modified Compaction*, *California Bearing Ratio (CBR)*, dan *Unconfined Compression Strength (UCS)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seiring meningkatnya persentase penambahan semen, nilai kadar air optimum juga meningkat. Nilai berat isi kering maksimum (γ_{dmaks}) dan nilai CBR pada awalnya mengalami peningkatan (sampai pada kadar semen 4%), namun mengalami penurunan pada kadar semen 6%. Nilai CBR tertinggi diperoleh pada penambahan kadar semen sebesar 4%, yaitu 97,22%. Nilai kuat tekan bebas (UCS) maksimum diperoleh pada penambahan kadar semen 4%, yaitu sebesar 34,92 kg/cm². Hasil ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan konstruksi jalan yang tidak hanya kuat dan berkelanjutan (SDG 9 dan 11), tetapi juga efisien dan bertanggung jawab dalam penggunaan sumber daya (SDG 12).

PENDAHULUAN

Lapisan pondasi merupakan bagian dari perkerasan jalan yang terletak tepat di bawah lapisan permukaan, menerima sebagian besar beban akibat kendaraan, dan mendistribusikannya ke lapisan tanah dasar. Terdapat tiga kelas yang berbeda pada lapisan pondasi agregat, yaitu kelas A, kelas B, dan kelas S. Lapisan pondasi agregat kelas A digunakan sebagai lapisan resap pengikat yang berada tepat di bawah lapisan permukaan perkerasan. Lapisan pondasi agregat kelas B digunakan sebagai lapisan pondasi bawah. Sedangkan lapisan pondasi agregat kelas S, yang juga disebut lapisan pondasi agregat kelas C, digunakan sebagai lapisan pondasi pada bahu jalan. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018), gradasi agregat kelas A cenderung lebih kasar, yang terlihat dari persentase agregat yang lolos ayakan. Pada agregat kelas A, persentase yang lolos ayakan berukuran 4,75 mm (No. 4) hanya 29–44%.

Kekuatan agregat dapat diketahui melalui pengujian di lapangan maupun di laboratorium. Adapun pengujian untuk memperoleh nilai kuat tekan bebas di lapangan dapat dilakukan dengan pengambilan inti (core) dari benda uji. Kemudian, untuk mendapatkan nilai CBR di lapangan, dapat dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* dan *Sand Cone Test*. Sedangkan pengujian yang dilakukan di laboratorium adalah *California Bearing Ratio* [1] dan *Unconfined Compression Strength* [2].

Untuk meningkatkan mutu campuran agregat, ada beberapa material yang dapat digunakan sebagai bahan tambah, misalnya semen, kapur, *fly ash*, bahan kimia atau bitumen. Penambahan semen Portland ke dalam agregat (seperti agregat Kelas A atau Kelas B) dapat meningkatkan kekuatan struktur perkerasan jalan. Semen Portland juga dapat ditambahkan saat menggunakan agregat *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Kadar semen yang ditambahkan mempengaruhi nilai CBR agregat kelas B. Oleh karena itu, penentuan kadar semen optimum menjadi krusial agar campuran tetap fleksibel tanpa kehilangan kekuatan geser. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan semen Portland tipe I terhadap kekuatan agregat kelas A, namun pada skala laboratorium, yakni dengan melakukan pengujian *California Bearing Ratio* dan *Unconfined Compression Strength*. Sebelumnya, dilakukan pengujian *Modified Compaction* untuk memperoleh nilai Kadar Air Optimum (W_{opt}) yang akan digunakan dalam campuran agregat dan semen.

Penelitian ini sejalan dengan upaya pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya Tujuan 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), Tujuan 11 (Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan), dan Tujuan 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Infrastruktur jalan yang andal merupakan prasyarat penting untuk mendukung mobilitas, distribusi barang, dan pertumbuhan ekonomi di suatu wilayah. Salah satu komponen penting dalam konstruksi perkerasan jalan adalah lapisan pondasi yang menggunakan agregat kelas A, yang kekuatannya sangat menentukan daya dukung dan umur layanan jalan. Untuk meningkatkan kualitas agregat tersebut, salah satu metode yang umum digunakan adalah stabilisasi dengan bahan tambah berupa semen Portland. Penambahan semen Portland pada kadar yang tepat dapat meningkatkan daya dukung agregat kelas A sehingga menghasilkan infrastruktur jalan yang lebih kuat dan tahan lama (SDG 9, target 9.1 dan 9.4). Namun demikian, penggunaan semen yang berlebihan tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan, sekaligus berkontribusi pada peningkatan biaya konstruksi dan emisi karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan dari proses produksi semen. Kondisi ini menegaskan pentingnya penentuan kadar optimum bahan tambah agar sumber daya yang digunakan tetap efisien, sejalan dengan prinsip konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab (SDG 12). Penelitian ini dilakukan dengan menguji variasi kadar semen Portland sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% pada agregat kelas A. Pemilihan variasi kadar semen tersebut didasarkan pada pertimbangan teknis dalam perencanaan campuran lapis fondasi agregat semen. Pedoman Perencanaan Campuran Lapis Fondasi Agregat Semen (LFAS) menetapkan bahwa kadar semen dalam campuran berada pada rentang 2%–8% dari berat agregat dalam kondisi kering oven, dan perencanaan campuran dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi kadar semen. Berdasarkan pertimbangan tersebut, kadar 0% digunakan sebagai campuran kontrol tanpa semen, sedangkan kadar 2%, 4%, dan 6% dipilih untuk mengevaluasi respons kekuatan agregat Kelas A terhadap peningkatan kadar semen secara bertahap. Pemilihan kadar 6% sebagai batas atas tidak dimaksudkan sebagai titik jenuh atau batas universal terjadinya penurunan kekuatan, melainkan sebagai bagian dari rentang eksperimental yang masih berada dalam rentang kadar semen yang ditetapkan dalam pedoman LFAS [3].

TINJAUAN PUSTAKA

Lapisan Pondasi Agregat

Terdapat 3 (tiga) kelas yang berbeda dari lapisan pondasi agregat, yaitu:

1. Lapisan pondasi agregat kelas A adalah lapisan pondasi yang berada di bawah lapisan aspal. Berdasarkan Spesifikasi Umum Kementerian Pekerjaan Umum Tahun 2018, lapisan pondasi agregat kelas A harus memiliki nilai CBR minimum 90% dan nilai indeks plastisitas (IP) sebesar 0%–6%. Dalam pelaksanaan di lapangan, pada lapisan pondasi agregat kelas A kemungkinan terjadi fluktuasi nilai indeks plastisitas akibat beberapa sebab, seperti tercampurnya lapisan pondasi agregat kelas A dengan material tanah yang memiliki nilai indeks plastisitas tinggi.
2. Lapisan pondasi agregat kelas B adalah lapisan pondasi bawah yang terletak di atas lapisan tanah dasar.
3. Lapisan pondasi agregat kelas S (disebut juga kelas C) digunakan untuk bahu jalan tanpa penutup aspal berdasarkan ketentuan tambahan.

Adapun gradasi berbagai macam lapisan pondasi agregat tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Gradasi Lapisan Pondasi Agregat

Ukuran Saringan Agregat Nomor	(mm)	Persen Lolos Saringan		
		Kelas A	Kelas B	Kelas S
2"	50	-	100	-
1½"	37.5	100	88 - 95	-
1 "	25	79 – 85	70 - 85	89 - 100
¾ "	9.5	44 – 58	30 - 65	55 - 90

No. 4	4.75	29 – 44	25 - 55	40 - 75
No. 10	2	17 – 30	15 - 40	26 - 59
No. 40	0.425	7 – 17	8 - 20	12 - 33
No. 200	0.75	2 – 8	2 - 8	4 - 6

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6, 2018 [4]

Seluruh lapisan pondasi agregat harus bebas dari bahan organik, gumpalan lempung, atau bahan lain yang tidak dikehendaki, dan setelah dipadatkan harus memenuhi ketentuan gradasi (menggunakan pengayakan basah) sebagaimana tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat-sifat Mutu Material yang Diisyaratkan

Sifat – sifat	Kelas A	Kelas B	Kelas C
Abrasi dari agregat kasar (SNI 2417-2008)	0 – 40 %	0 – 40 %	0 – 40 %
Indeks plastisitas (SNI 1966-2008)	0 – 6	6 – 12	4 – 15
Hasil kali indeks plastisitas dengan % lolos ayakan no. 200	Maks. 25	-	-
Batas cair (SNI 1967-2008)	0 – 25	0 – 35	0 – 35
Bagian yang lunak (SNI 03-4141-1996)	0 – 5 %	0 – 5 %	0 – 5 %
CBR (SNI 03-1744-1989)	Min. 90%	Min. 60%	Min. 50%

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6, 2018 [4]

Agregat kelas A sebagai material utama untuk lapisan pondasi atas (*base course*) dalam konstruksi perkerasan jalan harus memenuhi persyaratan teknis tertentu, seperti ukuran butiran, kekuatan tekan, keausan (nilai abrasi), dan tingkat kebersihan [5]. Namun, dalam beberapa kondisi seperti tanah dasar yang lemah atau lalu lintas berat, kekuatan alami agregat ternyata tidak cukup untuk menahan beban. Oleh karena itu, stabilisasi agregat dengan semen Portland menjadi solusi efektif untuk meningkatkan kualitas struktur jalan [6].

Semen Portland

Semen adalah bahan berbutir halus yang lolos ayakan 2 μm dan memiliki berat jenis 3–3,15 g/cm³. Semen memiliki sifat adhesif dan kohesif yang berfungsi sebagai bahan pengikat, sehingga memungkinkan fragmen-fragmen mineral lain melekat dan membentuk massa yang padat. Ketika semen dicampur dengan air, akan terjadi reaksi kimia antara komponen yang terkandung di dalamnya dan air. Reaksi-reaksi ini menghasilkan berbagai senyawa kimia yang menyebabkan pembentukan ikatan dan pengerasan. Sebagai bahan stabilisasi, semen memiliki beberapa keunggulan, antara lain: mudah diperoleh, hampir semua jenis tanah dapat distabilisasi dengan semen, serta setelah pencampuran dan pemadatan, tanah dan semen dapat mengeras dengan baik [7].

Semen dapat dibedakan dalam beberapa jenis, yaitu:

1. Semen putih, yaitu semen yang lebih murni daripada semen abu-abu dan digunakan untuk pekerjaan penyelesaian (*finishing*) sebagai *filler* atau pengisi. Semen ini dibuat dari bahan utama kalsit (*calcite*) dan *batu kapur* murni.
2. Semen Sumur Minyak (*Oil Well Cement*) adalah semen khusus yang digunakan dalam proses pengeboran minyak bumi atau gas alam, baik di darat maupun di lepas pantai.
3. Semen Portland, yaitu semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen Portland (terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis) bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain [8].

Pada dasarnya, semen Portland terdiri dari 4 unsur utama, yaitu trikalsium silikat (C3S) atau 3CaO.SiO₂; dikalsium Silikat (C2S) atau 2CaO.SiO₂; trikalsium Aluminat (C3A) atau 3CaO.Al₂O₃ dan tetrakalsium aluminoforit (C4AF) atau 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃. Perubahan komposisi kimia semen dengan mengubah persentase keempat komponen utama semen dapat menghasilkan beberapa jenis semen sesuai dengan tujuan penggunaannya. Sesuai dengan tujuan penggunaannya, semen Portland di Indonesia dapat dibagi menjadi beberapa tipe [8], yaitu:

1. Semen Portland Tipe I, yaitu semen Portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain. Semen Portland Tipe I dipergunakan untuk pengerasan jalan, gedung, jembatan, dan jenis konstruksi lain yang tidak berpotensi mengalami serangan sulfat dari tanah serta tidak mengalami timbulnya panas hidrasi yang tinggi.

2. Semen Portland Tipe II, yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau memiliki kalor hidrasi sedang. Semen Portland Tipe II digunakan untuk bangunan tepi laut, bendungan, dan irigasi, atau beton masa yang membutuhkan panas hidrasi rendah.
3. Semen Portland Tipe III, yaitu semen Portland yang digunakan untuk pekerjaan yang memerlukan kekuatan tinggi pada tahap awal setelah pengikatan. Semen Portland Tipe III digunakan untuk bangunan yang memerlukan kekuatan tekan tinggi (sangat kuat), seperti jembatan dan pondasi yang berat.
4. Semen Portland Tipe IV, yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah. Semen Portland Tipe IV digunakan untuk kebutuhan pengecoran yang tidak menimbulkan panas serta pengecoran dengan penyemprotan (waktu pengerasan *lebih* lama).
5. Semen Portland Tipe V, yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Semen Portland Tipe V digunakan untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi di dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan, serta pembangkit tenaga nuklir.

Komposisi penyusun semen Portland berdasarkan SNI 15-2049-2004 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi Semen Portland

No	Oksida	Komposisi
1	CaO	60 - 67 %
2	SiO ₂	17 – 25 %
3	Al ₂ O ₃	3 - 8 %
4	Fe ₂ O ₃	0,5 - 6,0 %
5	MgI	0,1 - 6,0 %
6	K ₂ O	0,5 - 1,3 %
7	LOI	5,0 %
8	IR	3,0 %

Sumber: SNI 15-2049-2004 [8]

Metode Stabilisasi dengan Semen Portland

Semen Portland merupakan bahan pengikat hidrolis yang berfungsi sebagai agen stabilisasi untuk meningkatkan sifat mekanis material berbutir seperti agregat. Stabilisasi agregat menggunakan semen Portland melibatkan reaksi kimia kompleks yang mengubah material lepas menjadi massa padat [9]. Ketika semen portland bercampur dengan air, proses hidrasi langsung aktif dan menghasilkan Kristal kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (Ca (OH)₂). Gel C-S-H berfungsi sebagai perekat mekanis di antara sela-sela butiran agregat kelas A, mengubah sifat lapis pondasi dari material lepas menjadi massa yang kaku dan padat [10]. Kristal gel (C-S-H) ini bertindak sebagai bahan pengikat (*cementitious matrix*) primer yang mengisi rongga mikro di antara butiran agregat Kelas A [11]. Proses ini dikenal sebagai *soil-cement stabilization* atau *cement-treated base* (CTB) dalam teknik jalan. Lapisan pondasi yang terbentuk dikenal dengan istilah Lapis Pondasi Agregat Semen (LPAS) atau *Cement-Treated Base* (CTB).

Terdapat beberapa pengaruh penambahan semen Portland terhadap kekuatan agregat, antara lain:

1. Meningkatkan Kekuatan Tekan
Penambahan semen pada agregat dapat meningkatkan kekuatan tekan sebesar 20–80%, tergantung pada proporsi semen dan jenis agregat. Kekuatan meningkat karena semen mengikat partikel agregat menjadi satu kesatuan struktural [12]. Penambahan semen Portland juga meningkatkan kekuatan tekan *uniaxial* (UCS) pada campuran agregat. Penambahan 5–10% semen dapat meningkatkan kekuatan tekan hingga 2–3 kali lipat dibandingkan dengan agregat tanpa semen.
2. Meningkatkan nilai California Bearing Ratio (CBR)
Nilai CBR meningkat secara signifikan seiring dengan penambahan semen. Penambahan 5% semen pada agregat kelas A meningkatkan nilai CBR dari 70% menjadi lebih dari 150%, sehingga cocok untuk lalu lintas berat. Stabilisasi agregat kelas A dengan 5% semen Portland meningkatkan nilai CBR dari 65% menjadi lebih dari 95%, sehingga menunjukkan peningkatan daya dukung lapisan pondasi.
3. Mengurangi Porositas dan Permeabilitas
Semen mengisi rongga di antara butiran agregat sehingga mengurangi porositas. Hasilnya adalah struktur yang lebih padat dan kedap air. Hal ini meningkatkan ketahanan terhadap cuaca dan erosi akibat air.

4. Meningkatkan Ketahanan Terhadap Cuaca

Penambahan semen juga meningkatkan ketahanan lapisan terhadap siklus pembekuan dan pencairan, yang biasanya menyebabkan kerusakan pada perkerasan [13]. Semen juga meningkatkan ketahanan terhadap siklus basah-kering (*wetting-drying cycles*) yang umum terjadi di lingkungan tropis. Hal ini mengurangi risiko disintegrasi dan deformasi agregat.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas penambahan semen Portland terhadap kekuatan agregat, antara lain:

1. Persentase Kadar Semen: Umumnya digunakan antara 3–10% dari berat kering agregat.
2. Kelembaban Optimum dan Pemadatan: Kadar air yang optimum sangat penting agar hidrasi semen berlangsung sempurna.
3. Waktu curing: Kekuatan meningkat seiring waktu curing, terutama pada 7–28 hari pertama.
4. Jenis Agregat: Jenis batuan asal agregat mempengaruhi hasil akhir stabilisasi.

Karakteristik Lapis Pondasi Agregat Semen (LPAS) / Cement Treated Base (CTB)

Volume penambahan semen Portland akan berkorelasi langsung dengan kuantitas gel binder yang terbentuk, yang pada gilirannya menentukan tingkat peningkatan kapasitas daya dukung agregat. Ikatan yang kuat antarpersendian agregat (*interlocking*) ini terus mengeras seiring bertambahnya umur pemeraman (*curing*), membentuk jaringan struktural kontinu yang membatasi pergerakan partikel individual di bawah beban roda [14]. Peningkatan modulus kekakuan (*stiffness*) mengurangi potensi deformasi permanen serta retak lelah (*fatigue failure*) pada lapisan aspal di atasnya akibat beban lalu lintas berat [11]. Penambahan semen Portland secara linier meningkatkan kapasitas mekanik lapisan pondasi agregat [15]. Struktur Lapisan Pondasi Agregat Semen (LPAS) Kelas A dirancang khusus untuk meningkatkan nilai daya dukung, seperti *California Bearing Ratio* (CBR) dan kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength/UCS*) [16]. Berdasarkan kriteria standar, campuran semen Portland semi-kering (tanpa slump) pada agregat mampu mendistribusikan beban roda secara lebih merata ke lapisan tanah dasar (*subgrade*) melalui mekanisme aksi balok (*beam action*), berbeda dengan agregat konvensional yang hanya mengandalkan gesekan antarpartikel [15].

METODOLOGI

Tahap Persiapan

Tahap Persiapan Material

Pada tahap ini dilakukan persiapan material yang meliputi agregat kasar, agregat halus, semen dan air, sebagai berikut:

- Agregat kasar berukuran 20-30 mm, 10-20 mm, dan 5-10 mm, dengan berat jenis minimal 2500 kg/m³.
- Agregat halus berukuran 0-5 mm, dengan berat jenis minimal 2500 kg/m³.
- Semen Portland tipe I dengan kadar 0%, 2%, 4%, dan 6%.
- Air diambil dari Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik USU.

Tahap Persiapan Alat

Pada tahap ini dipersiapkan alat pengujian yang digunakan untuk pemeriksaan agregat dan untuk pengujian benda uji, sebagai berikut:

- Alat pengujian yang digunakan untuk pemeriksaan agregat terdiri dari alat pengujian Analisis Saringan, alat pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar/Halus [17], [18], serta alat pengujian Abrasi [19].
- Alat untuk pengujian benda uji terdiri atas alat pengujian Pemadatan Modifikasi (*Modified Compaction Test*), alat pengujian *California Bearing Ratio*, dan alat pengujian *Unconfined Compression Strength*.

Tahap Pemeriksaan Agregat

Pemeriksaan sifat-sifat fisis agregat meliputi: analisis saringan agregat kasar dan halus (SNI 1968:2014), berat jenis dan penyerapan air agregat kasar (SNI 1969:2016), berat jenis dan penyerapan air agregat halus (SNI 1970:2016), serta uji abrasi (SNI 2417-2008).

Tahap Pembuatan Benda Uji

Pada tahap ini disiapkan benda uji untuk masing-masing pengujian yang akan dilakukan, yaitu:

- Benda uji untuk pengujian *Modified Compaction* dibuat sebanyak 5 buah untuk setiap variasi kadar semen, yaitu 0%, 2%, 4%, dan 6%.
- Berdasarkan nilai kadar air optimum (w_{opt}) yang diperoleh dari pengujian *Modified Compaction*, dibuat benda uji untuk pengujian *California Bearing Ratio (CBR)*. Benda uji dibuat sebanyak 3 buah untuk setiap variasi kadar semen, yaitu 0%, 2%, 4%, dan 6%.
- Berdasarkan nilai kadar air optimum (w_{opt}) yang diperoleh dari pengujian *Modified Compaction*, dibuat benda uji untuk pengujian *California Bearing Ratio*. Benda uji dibuat sebanyak 3 buah untuk setiap variasi kadar semen, yaitu 0%, 2%, 4%, dan 6%.

Jadi, seluruhnya berjumlah 44 benda uji.

Tahap Pengujian

Pengujian yang dilakukan ada 3 jenis, yaitu: pengujian *Modified Compaction*, pengujian *California Bearing Ratio (CBR)* dan pengujian *Unconfined Compression Strength (UCS)*, sebagai berikut:

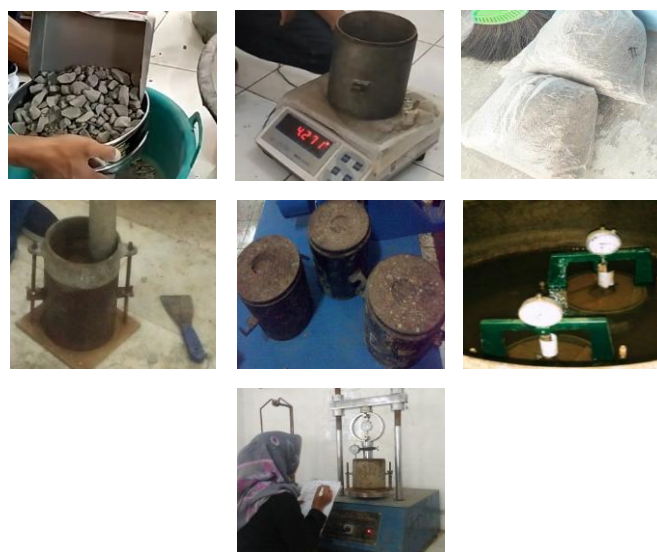
1. Pengujian *Modified Compaction* dilakukan untuk memperoleh nilai kadar air optimum (w_{opt}) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d maks}$) pada 4 variasi kadar semen, yaitu 0%, 2%, 4%, dan 6% (Gambar 1). Pengujian ini mengacu kepada SNI 1743:2008 atau ASTM D1557.



Gambar 1. Proses Pengujian *Modified Compaction*

2. Pengujian *California Bearing Ratio (CBR)*

Pengujian California Bearing Ratio (CBR) laboratorium dilakukan untuk mengukur ketahanan penetrasi campuran agregat dan semen terhadap beban standar. Adapun tahapan pada pengujian *California Bearing Ratio* mengacu kepada SNI 1744:2012 (Gambar 2). Pengujian ini dilakukan dengan metode perendaman (*soaked*) selama 4 hari setelah pemeraman untuk melihat ketahanan material terhadap perendaman air di lapangan.



Gambar 2. Proses Pengujian *California Bearing Ratio*

3. Tahap Pengujian *Unconfined Compression Strength (UCS)*

Pengujian ini dilakukan pada benda uji silinder yang telah diperam (curing) selama 7 hari. Penambahan semen Portland menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang mengunci interlock agregat kasar, secara linier menaikkan kekuatan tekan searah. Nilai hasil pengujian ini menjadi parameter utama untuk menilai keberhasilan pencampuran agregat. Lapisan Pondasi Agregat Semen (LPAS) umumnya menargetkan nilai UCS 7 hari sebesar 45 kg/cm² sesuai dengan standar nasional. Tahapan pengujian *Unconfined Compression Strength* mengacu kepada ASTM D1633 [20](Gambar 3).



Gambar 3. Proses Pengujian *Unconfined Compression Strength*

HASIL DAN PEMBAHASAN

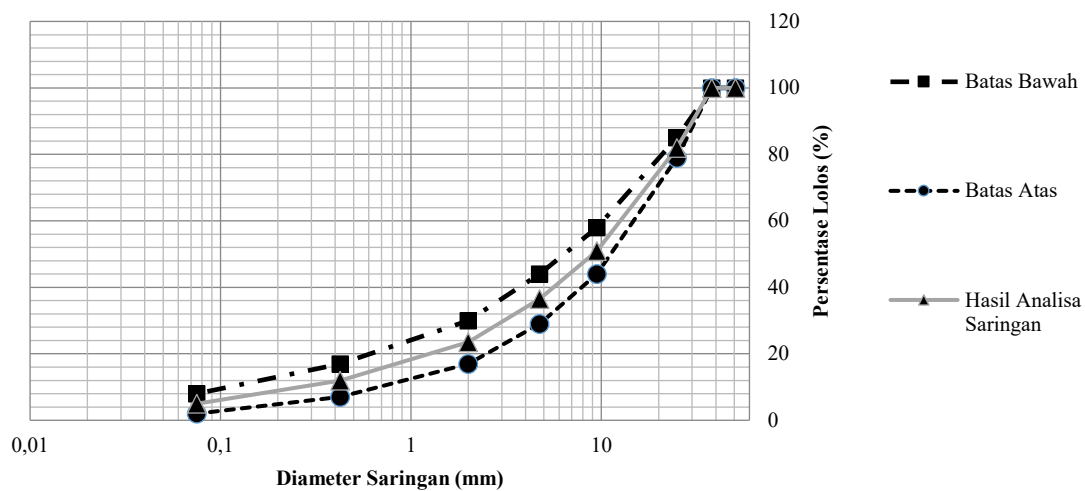
Hasil Pemeriksaan Agregat

Hasil pemeriksaan agregat meliputi hasil analisis saringan agregat kasar dan halus (Tabel 4 dan Gambar 4), serta hasil pemeriksaan berat jenis dan abrasi (Tabel 5).

Tabel 4. Hasil Analisa Saringan Agregat

No Saringan	Ukuran Diameter Saringan (mm)	Berat Tertahan (gram)	% Tertahan		% Lolos	Spesifikasi	Keterangan
			Individu	Kumulatif			
2"	51	0	0	0	100	-	
1,5"	38	0	0	0	100	100	
1"	25,5	990	18	18	82	79-85	
3/8"	9,53	1705	31	49	51	44-58	
no. 4	4,76	798	14,5	63,5	36,5	29-44	Memenuhi syarat
no. 10	2,06	715	13	76,5	23,5	17-30	
no. 40	0,42	633	11,5	88,0	12,0	7-17	
no. 200	0,075	385	7	95,0	5,0	2-8	
PAN	-	275	5	100,0	0,0	-	
TOTAL		5500					

Hasil Analisa Saringan Agregat



Gambar 4. Grafik Hasil Analisis Saringan Agregat

Tabel 5. Hasil Pemeriksaan Agregat

No	Jenis Pemeriksaan Agregat	Spesifikasi	Hasil Pemeriksaan	Keterangan
1	Berat Jenis Agregat Kasar	$>2,500 \text{ g/cm}^3$	2,734	Memenuhi Syarat
2	Berat Jenis Agregat Halus	$>2,500 \text{ g/cm}^3$	2,610	
3	Abrasi	0-40 %	30%	

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 4, gradasi agregat yang diperoleh telah memenuhi syarat karena berada dalam batas atas dan batas bawah sesuai Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 sebagai material penyusun agregat kelas A. Begitu juga, berdasarkan Tabel 5, diketahui bahwa hasil pemeriksaan berat jenis agregat kasar dan agregat halus serta abrasi semuanya memenuhi Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018.

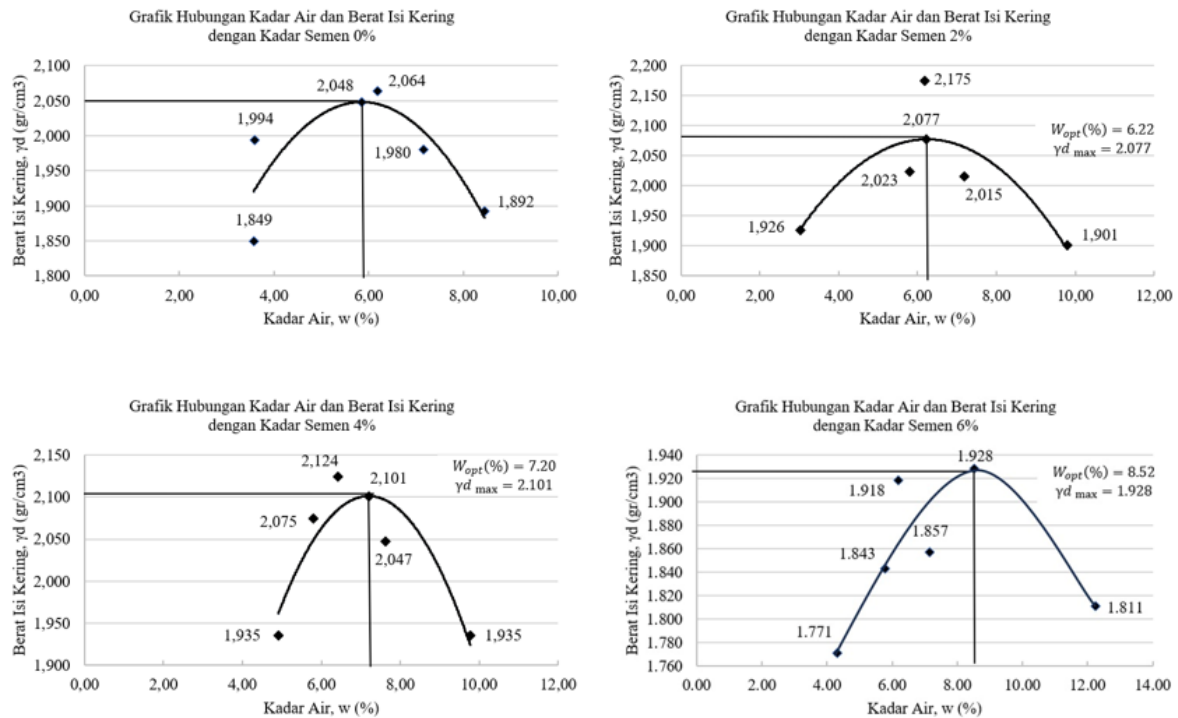
Hasil Pengujian Modified Compaction

Dari hasil pengujian *Modified Compaction* diketahui nilai kadar air optimum (w_{opt}) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) pada masing-masing variasi penambahan kadar semen (Tabel 6). Grafik hubungan kadar air optimum (w_{opt}) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) pada masing-masing variasi penambahan semen dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 6. Nilai Parameter Kompaksi

Kadar Semen (%)	Nilai Parameter Kompaksi Benda Uji					
		I	II	III	IV	V
0	Kadar air (w) (%)	3,57	3,60	6,18	7,16	8,44
	Berat isi kering (γ_d) (gr/cm^3)	1,849	1,994	2,064	1,980	1,892
2	Kadar air (w) (%)	3,03	5,79	6,18	7,18	9,79
	Berat isi kering (γ_d) (gr/cm^3)	1,926	2,023	2,175	2,015	1,901
4	Kadar air (w) (%)	4,91	5,79	6,42	7,62	9,77
	Berat isi kering (γ_d) (gr/cm^3)	1,935	2,075	2,124	2,047	1,935
6	Kadar air (w) (%)	4,32	5,79	6,18	7,16	12,25
	Berat isi kering (γ_d) (gr/cm^3)	1,771	1,843	1,918	1,857	1,811

Untuk setiap variasi kadar semen, diketahui nilai kadar air optimum berdasarkan Berat Isi Kering Maksimum (Gambar 5 dan Tabel 7).



Gambar 5. Grafik Hubungan Kadar Air Optimum dengan Berat Isi Kering Maksimum

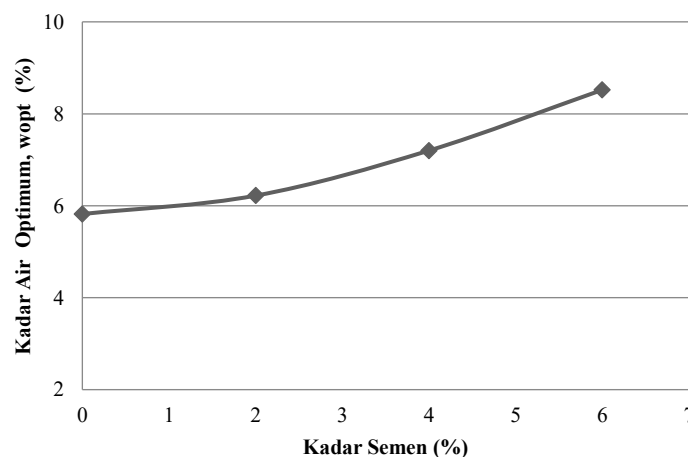
Tabel 7. Hubungan Kadar Semen dengan Nilai Parameter Kompaksi

No	Kadar Semen (%)	Kadar Air Optimum	Berat Isi Kering Maksimum
		w_{opt} (%)	$\gamma_{d\ max}$ (gr/cm ³)
1	0	5,85	2,048
2	2	6,22	2,077
3	4	7,20	2,101
4	6	8,52	1,928

Dari Tabel 7 diketahui hubungan kadar semen dengan nilai parameter kompaksi (nilai Kadar Air Optimum dan nilai Berat Isi Kering Maksimum) sebagai berikut:

1. Kadar Air Optimum (w_{opt})

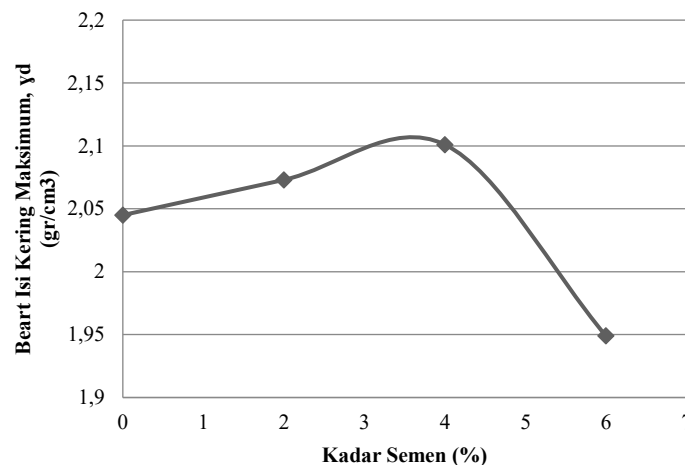
Semakin besar penambahan semen, semakin tinggi nilai kadar air optimum (Gambar 6). Nilai kadar air optimum terbesar terdapat pada agregat dengan penambahan kadar semen 6%, yaitu sebesar 8,52%. Peningkatan ini disebabkan oleh kebutuhan air selama proses hidrasi. Di samping itu, butiran semen yang halus memiliki permukaan yang luas, sehingga membutuhkan lebih banyak air untuk membasahi seluruh permukaannya.



Gambar 6. Grafik Hubungan Kadar Semen dengan Kadar Air

2. Berat Isi Kering Maksimum (γ_d maks)

Nilai berat isi kering maksimum terus meningkat seiring dengan peningkatan persentase penambahan semen. Nilai berat isi kering maksimum terbesar terdapat pada agregat dengan penambahan semen 4%, yaitu 2,101 g/cm³, tetapi pada penambahan semen 6% terjadi penurunan (Gambar 7). Penurunan nilai kepadatan ini diduga tidak hanya berkaitan dengan peningkatan kebutuhan air seiring meningkatnya persentase semen pada sampel, tetapi juga dipengaruhi oleh perubahan struktur partikel pada tahap awal hidrasi semen. Penambahan semen dapat menyebabkan flokulasi dan aglomerasi partikel, sehingga susunan dan karakteristik partikel berubah dan partikel menjadi lebih sulit disusun kembali selama proses pemadatan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan sebagian rongga tetap terperangkap dalam struktur campuran sehingga berat isi kering maksimum menurun. Perubahan karakteristik pemadatan akibat penambahan semen juga telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu, di mana peningkatan kadar semen hingga kadar tertentu dapat meningkatkan berat isi kering, sedangkan penambahan lebih lanjut dapat menyebabkan penurunan berat isi kering maksimum [21] [22] [23].



Gambar 7. Grafik Hubungan Kadar Semen dengan Berat Isi Kering Maksimum

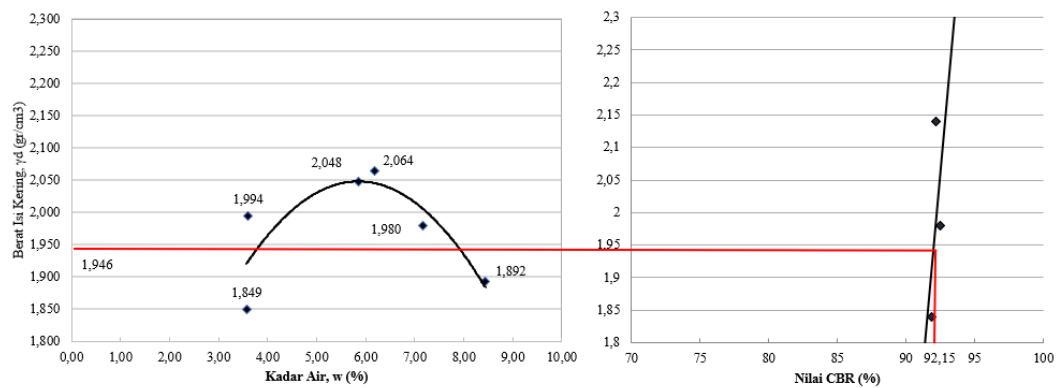
Selanjutnya, nilai Kadar Air Optimum untuk setiap variasi kadar semen digunakan untuk pengujian berikutnya, yaitu pengujian CBR dan UCS.

Hasil Pengujian California Bearing Ratio (CBR)

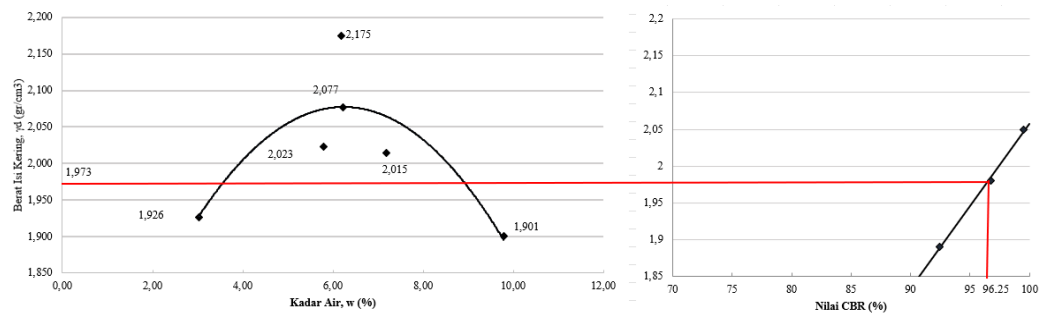
Seiring bertambahnya kepadatan, nilai CBR juga meningkat. Hal ini karena partikel tanah semakin rapat, rongga pori semakin berkurang, sehingga daya dukungnya meningkat. Berdasarkan nilai 95% Berat Isi Kering Maksimum (γ_d maks) untuk masing-masing variasi kadar semen, diperoleh nilai CBR rata-rata dari tiga kali pengujian. Hasil ini dapat dilihat pada Tabel 8, Gambar 8, Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11.

Tabel 8. Hasil Pengujian CBR

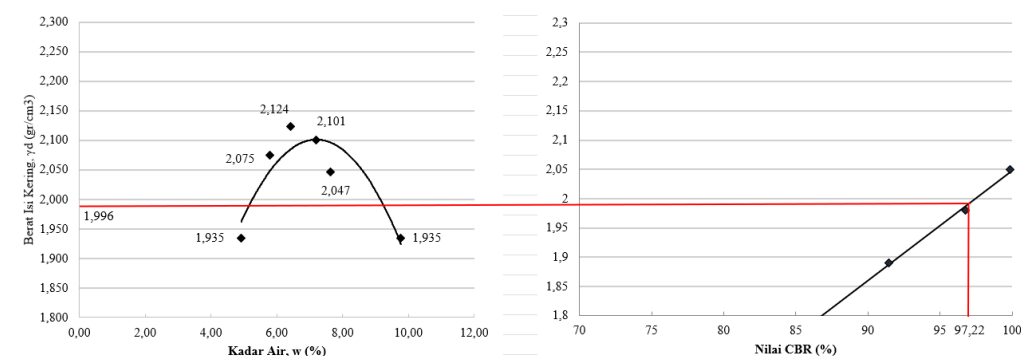
No	Kadar Semen (%)	Sampel	Nilai CBR (%)	95% Berat Isi Kering Maksimum, γ_d max (g/cm ³)	Nilai CBR (%)
1	0	I	92,45	1,946	92,15
		II	91,85		
		III	92,15		
2	2	I	92,43	1,973	96,25
		II	96,78		
		III	99,53		
3	4	I	95,05	1,996	97,22
		II	96,78		
		III	99,83		
4	6	I	89,43	1,832	92,76
		II	94,78		
		III	94,07		



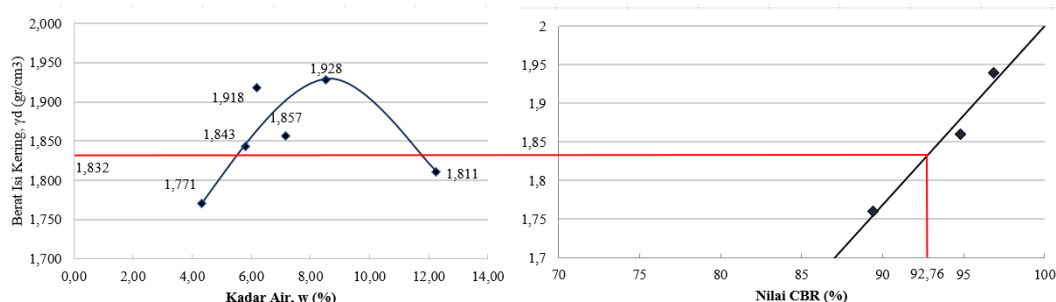
Gambar 8. Grafik Hubungan 95% Pemadatan dan Nilai CBR rata-rata dengan Kadar Semen 0%



Gambar 9. Grafik Hubungan 95% Pemadatan dan Nilai CBR rata-rata dengan Kadar Semen 2%



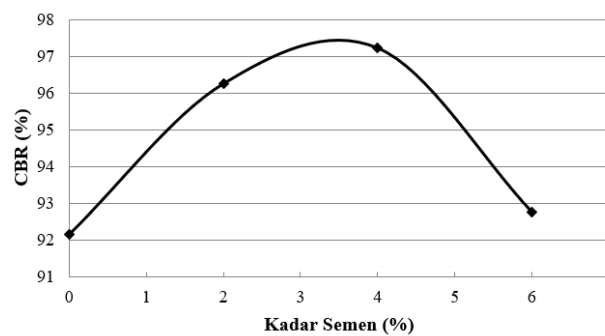
Gambar 10. Grafik Hubungan 95% Pemadatan dan Nilai CBR rata-rata dengan Kadar Semen 4%



Gambar 11. Grafik Hubungan 95% Pemadatan dan Nilai CBR rata-rata dengan Kadar Semen 6%

Hasil uji CBR rendaman dengan masa perawatan 4 hari menunjukkan peningkatan pada penambahan semen dibandingkan dengan nilai CBR tanpa penambahan semen (0%). Nilai CBR tertinggi terjadi pada sampel dengan penambahan semen 4%, yaitu 97,22%. Namun, terjadi penurunan nilai CBR dengan penambahan semen sebesar 6% (Gambar 12). Hasil

penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan semen dengan kadar 4% dapat direkomendasikan untuk memperoleh nilai CBR tertinggi. Hal ini sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018.



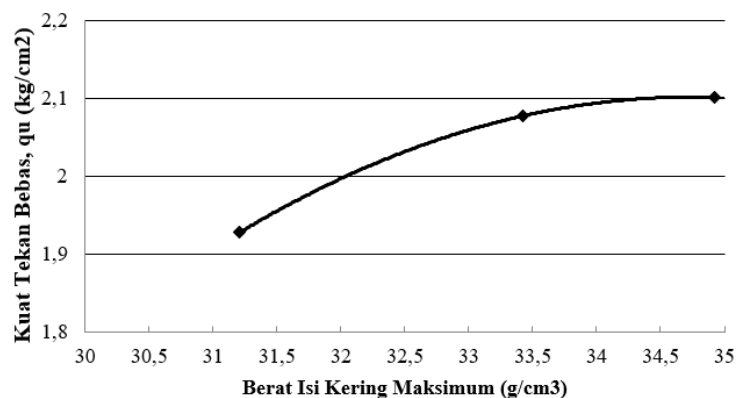
Gambar 12. Grafik Hubungan Kadar Semen dengan Nilai CBR

Hasil Pengujian Unconfined Compression Strength (UCS)

Hasil pengujian UCS untuk agregat kelas A dengan berbagai variasi kadar semen dapat dilihat pada Tabel 9. Dapat dilihat bahwa semakin tinggi berat isi kering agregat, semakin tinggi pula nilai kuat tekan bebasnya (Gambar 13).

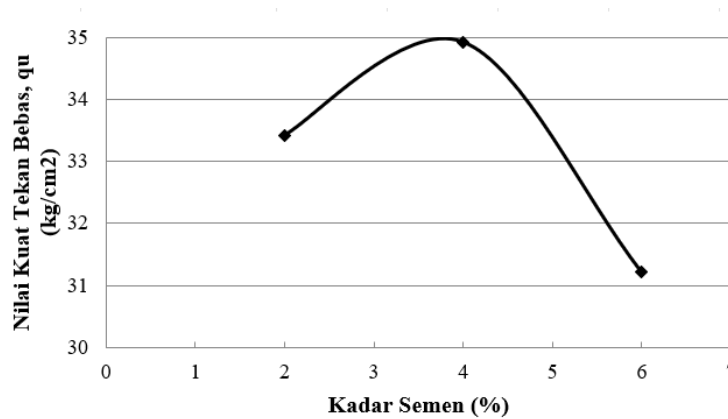
Tabel 9. Hasil Pengujian UCS

No	Kadar Semen (%)	Berat Isi Kering Maksimum, $\gamma_d \text{ max}$ (gr/cm ³)	Sampel	Kuat Tekan Bebas, q_u (kg/cm ²)	Kuat Tekan Bebas Rata-rata, q_u (kg/cm ²)
1	2	2,077	I	32,890	33,42
			II	33,758	
			III	33,607	
2	4	2,101	I	35,405	34,92
			II	34,620	
			III	34,744	
3	6	1,928	I	31,449	31,21
			II	30,617	
			III	31,565	



Gambar 13. Grafik Hubungan Berat Isi Kering Maksimum dengan Nilai Kuat Tekan Bebas

Penambahan kadar semen menyebabkan peningkatan nilai kuat tekan bebas, namun terjadi penurunan sebesar 6% pada kadar semen (Gambar 14). Dari hasil penelitian ini, nilai Kuat Tekan Bebas tertinggi diperoleh pada penambahan semen dengan kadar 4%, yaitu sebesar 34,92 kg/cm². Hal ini menunjukkan bahwa agregat telah saling terikat karena rongga pori pada sampel, baik seluruhnya maupun sebagian besar, telah terisi oleh butiran semen. Hal ini sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan semen dengan kadar 4% dapat direkomendasikan untuk memperoleh nilai kuat tekan tertinggi.



Gambar 14. Grafik Hubungan Kadar Semen dengan Nilai Kuat Tekan Bebas

Berdasarkan hasil pengujian, kadar semen 4% menghasilkan nilai UCS tertinggi sebesar 34,92 kg/cm², sehingga ditetapkan sebagai kadar optimum untuk campuran agregat Kelas A dalam penelitian ini. Namun, nilai tersebut masih di bawah persyaratan teknis yang berlaku, yaitu Lapis Pondasi Agregat Semen (LPAS) yang menargetkan UCS 7 hari sebesar 45 kg/cm², sehingga nilai 34,92 kg/cm² belum memenuhi persyaratan sebagai lapis pondasi atas (base course). Dengan demikian, “optimum” di sini bersifat relatif, yaitu yang terbaik di antara variasi kadar semen yang diuji, tetapi belum optimum menurut standar kinerja LPAS. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran tersebut belum layak direkomendasikan sebagai lapis pondasi atas yang menopang beban lalu lintas secara langsung. Di sisi lain, nilai 34,92 kg/cm² tersebut mendekati persyaratan Lapis Pondasi Bawah Agregat Semen (Cement Treated Sub-Base/CTSB) yang mensyaratkan UCS 7 hari sebesar 35 kg/cm², sehingga campuran ini lebih sesuai direkomendasikan untuk CTSB. Pada fungsi tersebut, lapisan menerima tegangan yang telah didistribusikan oleh lapisan di atasnya, sehingga kebutuhan kekuatannya lebih rendah. Penggunaan sebagai CTSB juga lebih efisien dari segi biaya karena tidak memerlukan kadar semen yang lebih tinggi.

KESIMPULAN

Pada uji pemadatan *Modified*, nilai berat isi kering maksimum pada awalnya meningkat sejalan dengan meningkatnya persentase penambahan kadar semen, tetapi kemudian terjadi penurunan pada kadar semen sebesar 6%. Nilai kadar air optimum yang diperoleh meningkat seiring dengan meningkatnya persentase kadar semen yang ditambahkan pada agregat kelas A, dibandingkan dengan nilai kadar air optimum pada agregat kelas A tanpa penambahan semen. Hasil uji CBR perendaman dengan masa perawatan 4 hari menunjukkan peningkatan nilai CBR pada tahap awal, tetapi terjadi penurunan kadar semen sebesar 6%. Hasil uji CBR tertinggi diperoleh pada sampel dengan penambahan semen sebesar 4%, yaitu 97,22%. Sedangkan hasil uji UCS dengan perawatan 7 hari menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan bebas pada awalnya, namun terjadi penurunan nilai UCS pada kadar semen 6%. Nilai Kuat Tekan Bebas tertinggi diperoleh pada sampel dengan penambahan kadar semen 4%, yaitu 34,92 kg/cm².

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan semen Portland dengan kadar 4% dapat direkomendasikan untuk mencapai nilai kuat tekan tertinggi. Temuan ini mengindikasikan bahwa kadar 4% merupakan kadar optimum penambahan semen Portland, di mana penambahan lebih lanjut tidak lagi memberikan manfaat teknis yang signifikan, bahkan cenderung tidak efisien dari segi penggunaan material. Penambahan semen Portland pada agregat kelas A memberikan pengaruh positif terhadap kekuatan mekanis, daya dukung, ketahanan terhadap air, serta umur layanan struktur jalan. Penggunaan yang tepat dari segi kadar dan teknik pencampuran dapat secara signifikan meningkatkan kualitas konstruksi jalan. Hasil ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan konstruksi jalan yang tidak hanya kuat dan berkelanjutan (SDG 9 dan 11), tetapi juga efisien dan bertanggung jawab dalam penggunaan sumber daya (SDG 12).

SARAN

Penelitian lanjutan disarankan menggunakan benda uji sesuai spesifikasi dan kadar semen antara 4% dan 6%, sehingga kadar optimum yang sebenarnya dapat berada dalam rentang tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional, "Cara uji CBR di Lapangan," *BSN.go.id*, 2011.
- [2] ASTM, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil 1," *ASTM International*, no. January, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1520/D2166.
- [3] MENTERI PEKERJAAN UMUM REPUBLIK INDONESIA, "Pedoman Perencanaan Campuran Lapis Fondasi Agregat Semen (LFAS)," 2007.
- [4] Direktorat Jenderal Bina Marga, "Spesifikasi Umum DIVISI VI 2018," No. September, 2018, doi: 10.1016/j.clnu.2012.07.008.
- [5] U. Pekerjaan, K. Jalan, dan D. Jembatan, "DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA SPESIFIKASI UMUM," 2018.
- [6] H. Hary Christady, "Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan," *Gadjah Mada University Press*, pp. 1–273, 2010.
- [7] B. M. Das, *Geotechnical Properties of Soil*. 2002.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 15-2049-2004 Semen Portland," *Badan Standar Nasional Indonesia*, pp. 1–128, 2004.
- [9] P. Krauss and T. Paret, *Review of Properties of Concrete*, vol. 28, no. 3. Trans-Atlantic Publications, Inc., 2014.
- [10] U. S. Lestari and P. B. Prakoso, "Compressive Strength Performance of Cement- Treated Base (Class A) with Waste Paper Pulp as Partial Fine Aggregate Replacement," vol. 8, no. 2, pp. 73–78, 2025.
- [11] A. Tana, S. S. Wibowo, and H. Rahman, "KAJIAN STABILISASI TANAH DENGAN SEMEN DAN BAHAN TAMBAH SEBAGAI LAPIS PONDASI PADA PERKERASAN JALAN (Studi Kasus : Tanah dari Kawasan Ibu Kota Nusantara)," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 31, no. 1, pp. 53–60, 2024, doi: 10.5614/jts.2024.31.1.6.
- [12] A. Riyanto dan S. Sunarjono, *Konstruksi-Desain Perkerasan dan Pemeliharaan Jalan Raya*. 2022.
- [13] Y. H. Huang, *Solutions manual pavement analysis and Design 2ème édition*. 2004.
- [14] A. Gazali and R. Adawiyah, "Pengaruh Penambahan Semen Portland Terhadap Lapisan Pondasi Jalan Berbahan Tanah Lunak Gambut Di Kalimantan Selatan," vol. 18, no. 3, pp. 185–192, 2018.
- [15] M. P. T. Rajagukguk and T. P. Hidayat, "Evaluasi Pelaksanaan Cement Treated Sub-base (CTSB) Pada Proyek Peningkatan Jalan Sukadana - Teluk Batang," *Jurnal Perkotaan*, vol. 16, no. 2, pp. 90–109, 2025, doi: 10.25170/perkotaan.v16i2.6214.
- [16] Munadrah *et al.*, "Analisis Kepadatan Lapis Pondasi Kelas A Terhadap Nilai CBR Soaked Pada Jalan Parkir Proyek Rehabilitasi dan Renovasi Stadion Gelora B.J. Habibie," *Journal of Engineering Science and Technology Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 8–15, 2025, doi: 10.58227/jesta.v3i1.221.
- [17] S. 1970:2016, "Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus," *Badan Standar Nasional Indonesia*, no. 4, p. 20, 2016.
- [18] S. 1969:2016, "Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar," *Badan Standar Nasional Indonesia*, p. 20, 2016, [Online]. Available: <https://pu.go.id/pustaka/biblio/sni-1969-2016-metode-uji-berat-jenis-dan-penyerapan-air-agregat-kasar/KB19B>
- [19] Badan Standardisasi Nasional, "Sni 2417:2008," *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*, pp. 1–5, 2008.
- [20] American Society for Testing and Materials, "ASTM D1633-00," Standard Test Methods for Compressive Strength of Moulded Soil-Cement Cylinders, pp. 1–15, 2007, [Online]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1633-00.htm>
- [21] T. A. Wassie and G. Demir, "Mechanical Strength and Microstructure of Soft Soil Stabilized with Cement, Lime, and Metakaolin-Based Geopolymer Stabilizers," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/6613742.
- [22] *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program*. Transportation Research Board, 2009.
- [23] G. E. Halsted, "Properties and Uses of Cement-Modified Soil for Pavements."