

PENGARUH *PARTIAL REPLACEMENT* SEMEN PORTLAND DENGAN *BENTONITE* TERHADAP KUAT TEKAN BETON BERDASARKAN VARIASI UMUR

Encik Junaidi Aprizal¹, Pusoko Prapto²

^{1,2}Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT-UNY
pusoko_prapto@uny.ac.id

ABSTRACT

This study aims to get the maximum compressive strength with high quality in determining the effect of partial replacement of cement with bentonite to the compressive strength of concrete. This study was conducted by testing the chemical composition of the bentonite by using the method of Atomic Absorption Spectrometry (AAS) and Gravimetry that refers to the ASTM 618-03. For testing the compressive strength of concrete it was used the age variation to assess the compressive strength of concrete using 10% of bentonite as the partial replacement for cement. There were 18 samples consisting of three cylindrical concrete samples in each age variation (the diameter was 150 mm and the height was 300 mm) and the testing was conducted at the age of 3, 7, 14, 21, 28 and 56 days. The results showed that the test of bentonite chemical composition in the Chemistry Analytical Laboratory of Gadjahmada University met the requirements of pozzolan chemical. The highest compressive strength at the age of 56 days and at 28 days the lowest compressive strength were 49.454 MPa and 37.119 MPa respectively. The percentage of the optimum increase of concrete obtained at the age of 28 days to 56 days was 33.23%. Moreover the addition of bentonite gives the effect to the workability so that the value of the slump was lower than the that in the planning.

Keywords: *Bentonite, Compressive strength, Slump*

PENDAHULUAN

Pembangunan dibidang struktur terus mengalami kemajuan yang sangat pesat, misalnya gedung, jembatan, dan sebagainya. Pembangunan konstruksi bangunan beton merupakan salah satu pilihan sebagai bahan struktur. Penggunaan beton pada konstruksi bangunan diminati karena memiliki kelebihan dibandingkan dengan bahan lainnya, antara lain karena harga yang relatif murah, bahan baku mudah didapat, mempunyai kekuatan yang baik, tahan lama, dan tahan terhadap api. Inovasi teknologi beton menuntut kreativitas dibidang ketekniksipil untuk menjawab tantangan akan kebutuhan beton, dimana beton yang dihasilkan diharapkan mempunyai kualitas tinggi.

Hal lain yang mendasari pemilihan dan penggunaan beton sebagai bahan konstruksi adalah faktor efektivitas dan tingkat efisiensi. Secara umum bahan pengisi (*filler*) beton terbuat dari bahan-bahan yang mudah diperoleh, mudah diolah (*workability*), dan mempunyai keawetan (*durability*) serta kekuatan (*strength*) yang diperlukan dalam suatu konstruksi. Dari sifat yang dimiliki beton itulah menjadikan beton sebagai bahan alternatif untuk dikembangkan baik bentuk fisik maupun metode pelaksanaannya. Semakin meningkat penggunaan beton di dunia industri konstruksi menyebabkan penggunaan material dari alam menjadi semakin tinggi. Hal ini ditandai dengan peningkatan terhadap jumlah konsumsi semen yang mencapai 40,7 juta ton pada tahun 2010 dengan tingkat pertumbuhan konsumsi semen diperkirakan sebesar 6% per tahun.

Penggunaan semen yang semakin meningkat mengakibatkan sebagai salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca global dari proses pembakaran *clinker* yang mencapai suhu ± 1500 °C. Oleh karena itu, perlu diupayakan langkah antisipasi dengan mengurangi konsumsi bahan bakar dalam proses produksi semen, salah satu diantaranya adalah dengan menggunakan bahan pozzolan alami seperti *bentonite* yang tidak memerlukan proses pembakaran ataupun perlu dibakar tetapi dalam suhu yang tidak terlalu tinggi untuk

menggantikan sebagian *clinker*, sehingga dapat mengurangi karbon dioksida (CO₂) dalam proses produksi semen. *Bentonite* sebenarnya memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan sebagai pozolan alami karena memberikan keuntungan, antara lain lebih ramah lingkungan, mudah karena tersebar secara luas di wilayah Indonesia, dan dapat menyerap tenaga kerja di sekitar lokasi penambangan. Selain itu penggunaan *bentonite* sebagai bahan alternatif pengganti semen akan menghasilkan beton yang relatif murah dibandingkan dengan beton normal.

Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian yang dilakukan adalah uji kuat tekan beton dengan melakukan penggantian sebagian semen dengan *bentonite*. Adapun penggunaan *bentonite* pada penelitian ini sebesar 10% dari berat semen dengan variasi pengujian beton pada umur 3, 7, 14, 21, 28 dan 56 hari. Pengujian dilakukan secara komprehensif dan multi disiplin dengan melibatkan para ahli dibidang teknologi beton dan kimia organik untuk mengoptimalkan potensi *bentonite* sebagai bahan tambah mineral agar menghasilkan beton dengan mutu tinggi.

Penggunaan beton yang semakin meningkat, memunculkan pemikiran untuk memaksimalkan penggunaan pozolan alami. Salah satunya dengan menggunakan *bentonite* sebagai material pengganti semen dalam pembuatan beton. Beberapa masalah yang berhubungan dalam pemanfaatan *bentonite* sebagai material pengganti semen, antara lain: (1) Komposisi senyawa kimia yang terkandung dalam *bentonite* (2) Kajian sifat mekanik beton yang berkaitan dengan penggunaan bahan tambah. (3) Kajian kinerja elemen struktur beton terhadap kuat tekan. (4) Studi kelayakan terkait investasi pemanfaatan *bentonite* sebagai bahan pengganti semen.

Penelitian ini menitikberatkan pada masalah yang berkaitan dengan penambahan bahan tambah *bentonite* sebagai bahan pengganti sebagian semen. Faktor-faktor yang dikendalikan dalam pelaksanaan penelitian ini meliputi: (1) Komposisi kimia *bentonite* diuji dengan metode *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). (2) Kuat tekan beton rencana (f'c) pada umur 28 hari sebesar 30 MPa. (3) Beton diuji tekan pada umur 3, 7, 14, 21, 28 dan 56 hari. (4) *Bentonite* sebagai bahan tambah berasal dari Tanjungharjo Kecamatan Nanggulan Kabupaten Kulonprogo dan persentase penggunaan *bentonite* yang disarankan sebesar 10%. (5) Penelitian menggunakan benda uji yang berupa silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, dengan sampel 18 silinder beton dengan 6 variasi umur yang masing-masing variasi tiga sampel.

Beton merupakan fungsi dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolis (*portland cement*), agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambah (*addmixture atau additive*) (Tri, 2003). Beton banyak digunakan dalam berbagai macam pembangunan, hal tersebut dikarenakan perawatan yang cukup mudah dan tahan terhadap serangan api. Agar dihasilkan kuat tekan beton yang sesuai rencana diperlukan *mix design* untuk menentukan jumlah masing-masing bahan susunan yang dibutuhkan. Di samping itu, adukan beton harus diusahakan dalam kondisi yang benar-benar homogen dengan kelecakan tertentu agar tidak terjadi *segregasi*. Selain perbandingan bahan susunannya, kekuatan beton ditentukan oleh padat tidaknya campuran bahan penyusun beton tersebut. Semakin kecil rongga yang dihasilkan dalam campuran beton, maka semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan.

Beton yang merupakan campuran dari semen, pasir, kerikil, dan air setelah mengeras akan mempunyai sifat yang berbeda-beda tergantung pada cara pembuatannya. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat-sifat beton yaitu, perbandingan campuran, cara mencampur, cara mencetak, cara memadatkan, dan cara merawat. Sifat-sifat beton pada umumnya tidak harus selalu dimiliki pada setiap konstruksi beton, karena sifat-sifat tersebut juga relatif ditinjau dari sudut pemakaian beton itu sendiri. Ada beberapa sifat-sifat umum pada beton, antara lain: (1) Kemampuan dikerjakan (*workability*) (2) Kuat tekan beton. Kuat tekan beton merupakan kemampuan yang dimiliki beton dalam menerima gaya tekan persatuan luas (Tri, 2003). (3) Rangkaian dan susut. Rangkaian (*creep*) merupakan

penambahan regangan terhadap waktu yang diakibatkan oleh adanya beban yang bekerja. Nilai rangkai untuk beton mutu tinggi lebih kecil dibandingkan dengan beton mutu rendah. Rangkai tidak menimbulkan dampak langsung terhadap kekuatan struktur akan tetapi mengakibatkan timbulnya redistribusi tegangan pada beban yang bekerja dan kemudian mengakibatkan terjadinya peningkatan lendutan (Tri, 2003). (4) Sifat tahan lama (*durability*). Sifat tahan lama pada beton, merupakan ketahanan beton terhadap pengaruh luar selama dalam pemakaian. (5) Segregasi. Segregasi terjadi karena agregat kasar turun ke bagian bawah pada beton segar atau agregat kasar terpisah dari campuran, yang diakibatkan karena cara penuangan dan pemadatan yang kurang benar. (6) *Bleeding*. *Bleeding* pada biasanya terjadi pada saat beton telah dicetak. Dengan adanya lapisan air yang terbentuk pada permukaan beton maka *bleeding* dapat diamati. *Bleeding* juga umumnya terjadi karena berat jenis semen lebih dari 3 kali berat jenis air, maka butir semen dalam pasta terutama yang cair cenderung turun. Terjadinya *bleeding* dapat diminimalisir dengan menambah semen maupun memakai semen dengan butir halus (Antoni dan Paul, 2007).

Agregat merupakan material granular misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku pijar yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton atau adukan semen hidrolik (SNI 03-2847-2002). Kandungan agregat dalam beton berkisar antara 60%-70% dari berat campuran beton. Walaupun fungsinya hanya sebagai pengisi, namun karena kandungan agregat dalam beton cukup besar dan sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat beton maka dalam pemilihan agregat kasar harus benar-benar diperhatikan kualitas agregatnya.

Agregat yang digunakan dalam campuran beton dapat berupa agregat alam atau agregat buatan (*artificial aggregates*). Secara umum, agregat dapat dibedakan berdasarkan ukurannya yaitu, agregat kasar dan agregat halus. Batasan antara agregat halus dan agregat kasar berbeda antar disiplin ilmu yang satu dengan yang lainnya. Meskipun demikian, dapat diberikan batasan ukuran antara agregat halus dengan agregat kasar yaitu 4.80 mm (*British Standard*) atau 4.75 (Standard ASTM).

Ditinjau dari besar butirannya agregat dibedakan menjadi dua yaitu agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus merupakan pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 0.15 mm sampai 5.0 mm (SNI 03-2847-2002). Agregat halus berperan penting sebagai pembentuk beton dalam pengendalian *workability*, kekuatan, dan keawetan beton. Oleh karena itu pemakaian pasir sebagai pembentuk beton harus dilakukan secara selektif. Agregat halus yang akan digunakan untuk membuat campuran harus memenuhi syarat-syarat yang sudah ditentukan menurut SNI S-04-1989-F. Sementara itu, agregat kasar merupakan hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm (SNI 03-2847-2002). Agregat kasar yang akan digunakan untuk membuat campuran harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan menurut SNI S-04-1989-F.

Portland Cement merupakan bahan pengikat hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker, terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dan gips sebagai bahan pembantu (SNI S-04-1989-F). Bahan dasar penyusun semen terdiri dari bahan-bahan yang mengandung kapur, silika, dan oksida besi. Susunan unsur *Portland Cement*, dimana oksida-oksida tersebut berinteraksi satu sama lain untuk membentuk serangkaian produk yang lebih kompleks selama proses peleburan. Menurut ASTM, semen portland dibedakan menjadi beberapa tipe sesuai dengan penggunaannya, tipe semen tersebut yaitu: (1) Tipe I. Semen portland jenis umum (*normal portland cement*), merupakan semen portland untuk penggunaan dalam konstruksi beton secara umum yang tidak memerlukan sifat-sifat khusus. Misalnya untuk pembuatan trotoar, urug-urug, pasangan bata, dan sebagainya. (2) Tipe II. Semen dengan jenis umum dengan perubahan-perubahan (*modified portland cement*). Semen ini memiliki panas hidrasi lebih rendah dan keluarnya panas lebih lambat daripada semen jenis I. Jenis semen ini digunakan untuk bangunan tebal-tebal seperti pilar dengan ukuran besar, tumpuan dinding tanah tebal, dan sebagainya. Panas hidrasi

yang cukup rendah dapat mengurangi terjadinya retak-retak pengerasan. Jenis ini juga dapat digunakan untuk bangunan-bangunan drainase di tempat yang memiliki konsentrasi sulfat cukup tinggi. (3) Tipe III. Semen portland dengan kekuatan awal tinggi (*high early strength portland cement*). Jenis ini memperoleh kekuatan besar dalam waktu singkat, sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki bangunan beton yang perlu segera dilepas. (4) Tipe IV. Semen portland dengan panas hidrasi yang rendah (*low heat portland cement*). Jenis ini merupakan jenis khusus untuk penggunaan yang memerlukan panas hidrasi serendah-rendahnya. Jenis ini digunakan untuk bangunan beton massa seperti bendungan-bendungan gravitasi besar. (5) Tipe V. Semen portland tahan sulfat (*sulfate resisting portland cement*). Jenis ini merupakan jenis khusus yang maksudnya hanya untuk penggunaan pada bangunan-bangunan yang terkena sulfat, seperti di tanah atau air yang kadar alkalinya tinggi. Pengerasan berjalan lebih lambat daripada semen portland biasa.

Kardiyono (2007:14) berpendapat, semen portland pozolan adalah suatu bahan perekat hidrolis yang dibuat dengan menggiling halus klinker semen portland dan pozolan, atau suatu campuran yang merata antara bubuk semen portland dan bubuk pozolan selama penggilingan atau pencampuran. Pozolan ialah bahan alami atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silikat (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) yang reaktif. Pozolan tidak bersifat seperti semen, namun dalam bentuknya yang halus jika dicampur dengan kapur padam aktif dan air pada suhu kamar akan mengeras dalam beberapa waktu, sehingga membentuk masa yang padat dan sukar larut dalam air.

Semen portland pozolan menghasilkan panas hidrasi lebih sedikit dari pada semen biasa. Jenis penggunaan semen portland pozolan dalam SNI 15-0302-2004 dibedakan menjadi empat jenis, yaitu: (1) Jenis IP-U yaitu semen portland pozolan yang dapat dipergunakan untuk semua tujuan pembuatan adukan beton. (2) Jenis IP-K yaitu semen portland pozolan yang dapat dipergunakan untuk semua tujuan pembuatan adukan beton, semen untuk tahan sulfat sedang dan panas hidrasi sedang. (3) Jenis P-U yaitu semen portland pozolan yang dapat dipergunakan untuk pembuatan beton dimana tidak disyaratkan kekuatan awal yang tinggi. (4) Jenis P-K yaitu semen portland pozolan yang dapat dipergunakan untuk pembuatan beton dimana tidak disyaratkan kekuatan awal yang tinggi, serta untuk tahan sulfat sedang dan panas hidrasi rendah.

Air merupakan bahan penyusun beton yang diperlukan pada saat pembuatan beton guna memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat, dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton (Tri, 2003). Dalam proses hidrasi beton segar membutuhkan air sekitar 25% dari berat semen yang digunakan, tetapi dalam kenyataan jika nilai faktor air semen kurang dari 35% beton segar menjadi tidak dapat dikerjakan dengan sempurna sehingga setelah mengeras, beton yang dihasilkan menjadi keropos dan memiliki kekuatan yang rendah. Kelebihan air dari proses hidrasi diperlukan untuk syarat-syarat kekentalan (*consistency*) agar dapat dicapai suatu kelecakan (*workability*) yang baik. Kelebihan air ini akan menguap atau tertinggal di dalam beton sehingga menimbulkan pori-pori (*capillary poreous*) di dalam beton yang sudah mengeras (Slamet, 2008).

Air pada campuran beton akan berpengaruh terhadap: (1) Sifat *workability* adukan beton. (2) Besar kecilnya nilai susut beton. (3) Kelangsungan reaksi dengan semen Portland, sehingga dihasilkan dan kekuatan selang beberapa waktu. (4) Perawatan keras adukan beton guna menjamin pengerasan yang baik. Air untuk pembuatan beton minimal memenuhi syarat sebagai air minimum yaitu tawar, tidak berbau, dan bila dihembuskan dengan udara tidak keruh. Penggunaan air untuk beton sebaiknya air yang memenuhi persyaratan yang digunakan untuk membuat campuran beton (Kardiyono, 1992), yaitu: (1) bersih, tidak mengandung lumpur, minyak, dan benda terapung lain yang dapat dilihat secara vertikal. (2) Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter. (3) Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dan sebagainya) tidak lebih dari 15 gram/liter. Kandungan klorida tidak lebih dari 500ppm dan senyawa sulfat tidak lebih dari 100ppm.

Bahan tambah yaitu bahan selain komponen pokok pada beton (air, semen, dan agregat) yang ditambahkan ke dalam adukan beton, baik sebelum, segera, atau selama pengadukan beton dengan tujuan mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton sewaktu masih dalam keadaan segar atau setelah mengeras. Bahan tambah diberikan dalam jumlah yang relatif sedikit dengan pengawasan yang ketat agar tidak berlebihan yang dapat mengakibatkan menurunnya kualitas beton. Bahan tambah menurut cara penggunaannya dibagi menjadi dua golongan yaitu *admixtures* dan *additives*. *Admixtures* merupakan bahan penyusun beton selain air, semen hidrolis, dan agregat yang ditambahkan sebelum, segera, atau selama proses pencampuran adukan di dalam *batching*, untuk merubah sifat beton baik dalam keadaan segar atau setelah mengeras. Sedangkan istilah *additive* lebih mengarah pada semua bahan yang ditambahkan dan digiling bersama-sama dalam proses produksi semen (Taylor, 1977).

Secara garis besar, bahan tambah dapat dibedakan menjadi 3 golongan, yaitu: (1) *Chemical admixtures* merupakan bahan tambah bersifat kimiawi yang dicampurkan pada adukan beton dengan maksud agar diperoleh sifat-sifat yang berbeda pada beton dalam keadaan segar maupun setelah mengeras, misalnya sifat pengerjaannya yang lebih mudah dan waktu pengikatan yang lebih lambat atau lebih cepat. *Superplasticizer* merupakan salah satu jenis *chemical admixture* yang sering ditambahkan pada beton segar. Pada dasarnya penambahan *superplasticizer* dimaksudkan untuk meningkatkan kelecakan, mengurangi jumlah air yang diperlukan dalam pencampuran (faktor air semen), mengurangi *slump loss*, mencegah timbulnya *bleeding* dan segregasi, menambah kadar udara (*air content*) serta memperlambat waktu pengikatan (*setting time*). (2) Serat (*fibre*) merupakan bahan tambah yang berupa asbestos, gelas/kaca, plastik, baja atau serat tumbuh-tumbuhan (rami/ijuk). Penambahan serat ini dimaksudkan untuk meningkatkan kuat tarik, menambah ketahanan terhadap retak, meningkatkan daktilitas dan ketahanan beton terhadap beban kejutan (*impact load*) sehingga dapat meningkatkan keawetan/durabilitas beton, misalnya pada perkerasan jalan raya atau lapangan udara, *spillway* serta pada bagian struktur beton yang tipis untuk mencegah timbulnya keretakan. (3) Bahan pengganti sebagian semen (*pozzolan*) merupakan bahan tambah yang berasal dari alam atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silikat dan aluminat yang reaktif. Pozolan sendiri tidak mempunyai sifat semen, tetapi dalam keadaan halus bereaksi dengan kapur bebas dan air menjadi suatu massa padat yang tidak larut dalam air. Pozolan dapat ditambahkan pada campuran adukan beton atau mortar (sampai batas tertentu dapat menggantikan semen), untuk memperbaiki kelecakan (*workability*), membuat beton menjadi lebih kedap air (mengurangi permeabilitas) dan menambah ketahanan beton atau mortar terhadap serangan bahan kimia yang bersifat agresif. Penambahan pozolan juga dapat meningkatkan kuat tekan beton karena adanya reaksi pengikatan kapur bebas (Ca(OH)_2) oleh silikat atau aluminat menjadi *tobermorite* ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Pozolan yang saat ini telah banyak diteliti dan digunakan antara lain *silica fume*, *fly ash*, tras alam dan abu sekam padi (*rice husk ash*).

Bentonite adalah istilah untuk lempung yang terdiri atas mineral monmorilonit sebagai kandungan utamanya. Kandungan monmorilonit pada *bentonite* berkisar antara 70%-80%. Oleh karena itu *bentonite* sering disebut sebagai nama dagang dari monmorilonit. Selain monmorilonit, kandungan mineral lain dalam *bentonite* antara lain berupa mineral kaolinit, illit, kuarsa, plagioklas, kristobalit dan sebagainya (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara, 2005). *Bentonite* merupakan lempung dari golongan smektit yang memiliki rumus kimia $(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{Al}_4\text{O}_{20} \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Struktur atom monmorilonit terdiri atas lapisan oktahedral dari alumina yang diapit oleh lapisan tetrahedral silika. Pada lapisan tetrahedral, terjadi substitusi isomorfik antara Si^{4+} dengan Al^{3+} , sedangkan pada bagian oktahedral Al dapat disubstitusikan oleh Fe atau Mg. Substitusi isomorfik yang terjadi pada lapisan tetrahedral maupun pada lapisan oktahedral menyebabkan monmorilonit relatif bermuatan negatif dan muatan dari monmorilonit ini akan distabilkan oleh kation yang terdapat di bagian interlayer. Sedangkan berdasarkan tipenya, *bentonite* dibagi menjadi dua, yaitu: (1) Tipe Wyoming (*Na-bentonite* – *Swelling bentonite*). *Na bentonite* memiliki daya mengembang hingga delapan kali apabila dicelupkan ke dalam air

dan tetap terdispersi beberapa waktu di dalam air. Dalam keadaan kering berwarna putih atau cream, pada keadaan basah dan terkena sinar matahari akan berwarna mengkilap. Perbandingan soda dan kapur tinggi, suspensi koloidal mempunyai pH: 8,5-9,8, tidak dapat diaktifkan. Posisi pertukaran diduduki oleh ion-ion sodium (Na^+). (2) Mg, (*Ca-bentonite* – *non swelling bentonite*). Tipe *bentonite* ini kurang mengembang apabila dicelupkan ke dalam air dan tetap terdispersi di dalam air, tetapi secara alami atau setelah diaktifkan mempunyai sifat menghisap yang baik. Perbandingan kandungan Na dan Ca rendah, suspensi koloidal memiliki pH: 4-7. Posisi pertukaran ion lebih banyak diduduki oleh ion-ion kalsium dan magnesium. Dalam keadaan kering bersifat rapid slaking, berwarna abu-abu, kuning, merah dan cokelat. Bahan alam *bentonite* ini tersebar luas di Indonesia. Menurut ASTM C 618-92a, *pozzoland* didefinisikan material yang mengandung silika dan alumina dalam bentuk yang halus dan dalam kondisi normal akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) membentuk senyawa yang mengandung sifat semen. *Pozzoland* biasanya memiliki kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang tinggi dan unsur ini yang diharapkan bereaksi dengan kapur bebas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sisa tersebut.

Dalam penelitian ini ada beberapa bahan yang digunakan untuk pembuatan benda uji. Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: (1) *Pozzoland Portland Cement* (PPC). Pada penelitian ini semen yang digunakan adalah semen dengan merek Gresik yang mempunyai berat 40 kg tiap sak. Berdasarkan SNI 15-0302-2004 semen ini termasuk PPC jenis IP-U, yaitu semen portland pozolan yang dapat dipergunakan untuk semua tujuan pembuatan adukan beton. (2) Agregat Halus. Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat halus yang berasal dari gunung merapi. (3) Agregat Kasar. Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat kasar yang berasal dari gunung merapi. (4) Air. Pada penelitian ini air yang digunakan merupakan air dari Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT UNY. (5) *Bentonite*. *Bentonite* yang digunakan sebagai bahan pengganti semen dalam penelitian ini berasal dari daerah Tanjungharjo Kecamatan Nanggulan Kabupaten Kulon Progo. *Bentonite* ini sudah diuji di Laboratorium Kimia Analitik UGM.

Selain ketersediaan bahan-bahan pembuatan benda uji, kelancaran penelitian ini juga ditunjang oleh alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini, adapun alat-alat yang digunakan antara lain: (1) Timbangan. Dalam pelaksanaan penelitian ini ada beberapa jenis timbangan yang digunakan, dikarenakan berat material yang ditimbang bervariasi sehingga timbangan yang digunakan juga harus menyesuaikan dengan kebutuhan. Adapun timbangan yang digunakan antara lain: (a) Timbangan dengan ketelitian 0,01 gram. Timbangan dengan ketelitian 0,01 gram berfungsi untuk menimbang bahan-bahan yang akan digunakan untuk pengujian berat jenis, kadar air, kadar lumpur, dan beberapa pengujian lain yang beratnya dibawah 300 gram. Timbangan dengan ketelitian 0,01 gram yang digunakan dalam Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT UNY bermerek Ohaus. (b) Timbangan Sedang. Timbangan dengan kapasitas timbang digunakan untuk bahan-bahan yang digunakan pada saat akan melaksanakan proses pengecoran atau untuk menimbang material yang akan diuji seperti untuk pengujian Los Angeles dan lain. (c) Timbangan Besar. Timbangan dengan kapasitas banyak ini digunakan untuk menimbang beberapa material yang akan digunakan untuk membuat benda uji dan untuk menimbang pengujian bobot isi agregat kasar dan halus. (2) Oven. Dalam pelaksanaan penelitian ini digunakan oven untuk pengujian agregat kasar dan halus. (3) Ayakan Agregat Halus. Ayakan agregat halus yang digunakan untuk pengujian modulus kehalusan butir (MKB). Ayakan agregat halus memiliki lubang ayakan yang terbesar 9,52mm dan terkecil <0,15mm dengan merek Tatonas. (4) Ayakan Agregat Kasar. Ayakan agregat kasar yang digunakan untuk pengujian modulus kehalusan butir (MKB), memiliki lubang ayakan yang terbesar 50mm dan terkecil 12,5mm. (5) Bejana. Bejana yang digunakan untuk pengujian bobot isi, baik bobot isi agregat halus maupun kasar. (6) Gelas Ukur. Gelas ukur digunakan untuk menguji berat jenis, baik berat jenis agregat halus maupun kasar. (7) Mesin Los Angeles. Mesin Los Angeles ini digunakan untuk menguji keausan agregat kasar. (8) Molen. Molen ini digunakan untuk bahan adukan beton benda uji yang terdiri dari agregat halus, agregat kasar, semen, air, dan

Pengaruh *Partial Replacement* ... (Encik/ hal. 67 - 78)

bentonite. (9) Kerucut *Abrams*. Kerucut *abrams* digunakan untuk mengukur nilai *slump* pada adukan beton yang sudah jadi. (10) Silinder. Silinder ini digunakan untuk mencetak adukan beton untuk dibentuk menjadi silinder beton. (11) Mesin Uji Tekan. Mesin uji tekan digunakan untuk menekan benda uji berupa beton silinder untuk mengetahui berapa beban maksimal yang dihasilkan. (12) Kerucut Terpancung. Kerucut *abrams* ini digunakan untuk menguji pasir dalam keadaan SSD (*Saturated Surface Dry*). (13) Meteran. Meteran dalam penelitian ini digunakan untuk mengukur nilai *slump*. (14) Jangka Sorong. Jangka sorong dalam penelitian ini digunakan untuk mengukur diameter dan tinggi pada silinder beton.

METODE

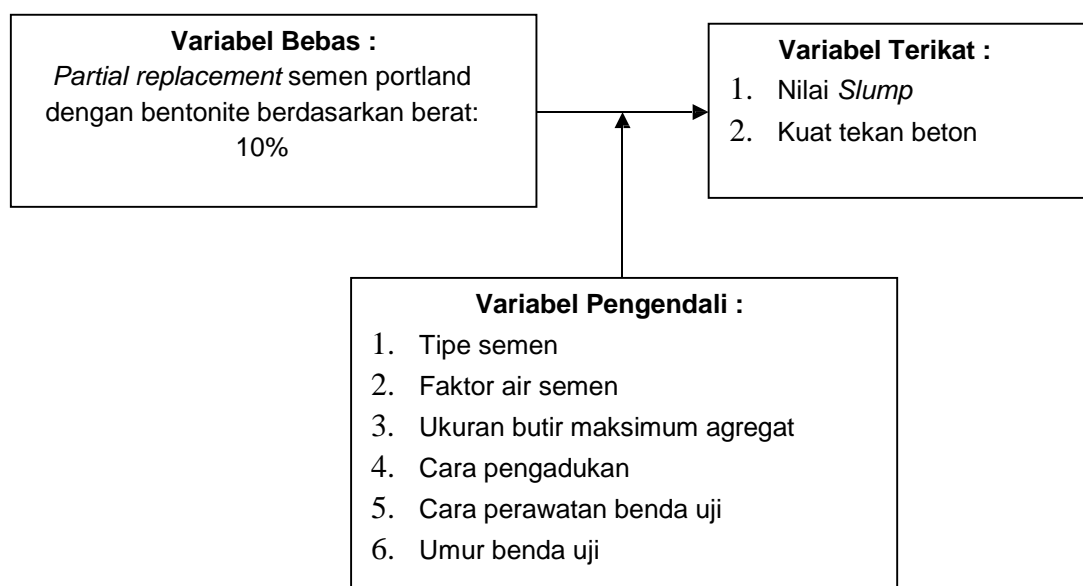
Metode yang dilakukan adalah dengan cara membuat benda uji beton silinder dengan bahan tambahan *bentonite* dan pengujian material di Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT UNY, kemudian dilakukan uji tekan dengan variasi umur beton 3, 7, 14, 21, 28 dan 56 hari. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kekuatan maksimal yang akan dihasilkan dengan penggunaan *bentonite*.

Pemeriksaan material meliputi: (1) Pengujian Agregat Halus yang terdiri dari (a) Pengujian Berat Jenis SSD (b) Pengujian Kadar Air Alami (c) Pengujian Kadar Air SSD (d) Pengujian Kadar Lumpur (e) Pengujian Modulus Kehalusan Butir (f) Pengujian Bobot Isi Gembur (g) Pengujian Bobot Isi Padat dan (h) Pengujian Kandungan Zat Organik (2) Pengujian Agregat Kasar yang terdiri dari (a) Pengujian Berat Jenis SSD (b) Pengujian Kadar Air Alami (c) Pengujian Kadar Air SSD (d) Pengujian Kadar Lumpur (e) Pengujian Modulus Kehalusan Butir (f) Pengujian Bobot Isi Gembur (g) Pengujian Bobot Isi Padat dan (h) Pengujian Keausan Kerikil (3) Pengujian *Bentonite*, untuk pengujian *bentonite* diuji dari pihak Laboratorium Kimia Analitik Universitas Gadjah Mada.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode "*The British Mix Design Method*" atau lebih dikenal dengan *DOE (Departement Of Envorenment)*. Langkah-langkah pokok rancangan dapat dijelaskan sebagai berikut: (1) Penetapan Kuat Desak Beton (2) Penetapan Nilai Deviasi Standar (S) (3) Penetapan Nilai Tambah (Margin):M (4) Menentukan Kuat Desak Rata-rata yang Direncanakan (5) Penetapan Jenis Semen (6) Penetapan Jenis Agregat (7) Penetapan Faktor Air Semen. Dalam Perencanaan Campuran Adukan Beton, nilai faktor air semen ditetapkan dengan salah satu dari 2 cara berikut: (a) Berdasarkan jenis semen yang dipakai dan kuat tekan rata-rata pada umur tertentu (b) Berdasarkan jenis semen yang dipakai, jenis agregat kasar, dan kuat tekan rata-rata yang direncanakan (8) Faktor Air Semen Maksimum (9) Penetapan Nilai *Slump* (10) Menetapkan Ukuran Agregat Maksimum (11) Menetapkan Jumlah Kebutuhan Air per Meter Kubik Beton (12) Menghitung berat semen yang diperlukan (13) Menghitung kebutuhan semen minimum (14) Penyesuaian kebutuhan semen (15) Faktor air semen yang disesuaikan (16) Penentuan Daerah Gradasi Agregat Halus (17) Perbandingan agregat halus dan agregat kasar (18) Berat Jenis Agregat Campuran (19) Menentukan Berat Jenis Beton (20) Kebutuhan Agregat Campuran (21) Kebutuhan Agregat Halus dan (22) Kebutuhan Agregat Kasar. Dalam pembuatan benda uji jumlah beton silinder yang akan dibuat sebanyak 18 benda uji dengan tiap variasi umur terdapat 3 benda uji beton. Pembuatan benda uji beton silinder ini harus dilakukan dengan penuh ketelitian. Adapun langkah-langkah pembuatan benda uji yaitu: (1) Menyiapkan alat dan bahan (2) Proses pencampuran atau pengadukan.

Pengujian dilakukan dengan (1) *Caping* (Pelapisan permukaan muka beton). Sebelum dilakukan pengujian kuat tekan beton, terlebih dahulu ditimbang serta diukur diameter dan tingginya. Setelah proses pengukuran selesai maka dilakukan pengkapingan beton dengan tujuan agar permukaan beton rata, sehingga saat diuji kuat tekannya penyaluran beban menjadi rata. (2) Uji Kuat Tekan Beton. Kuat tekan beton merupakan salah satu kinerja utama beton. Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas

(Tri, 2003). Setelah beton mencapai umur yang telah direncanakan dalam penelitian ini pengujian kuat tekan beton dilakukan pada saat usia beton 3, 7, 14, 21, 28 dan 56 hari. Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan menggunakan *Compressive Testing Machine* atau merupakan mesin tekan yang ada di Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT UNY. Proses penekanan dilakukan dengan meletakkan silinder beton pada pusat bidang mesin tekan, pembebanan dilakukan secara perlahan sampai beton mengalami retak. Penelitian pengaruh *particial replacement* semen Portland dengan *bentonite* terhadap kuat tekan beton berdasarkan variasi umur menggunakan *bentonite* sebesar 10% dari berat semen, memiliki tiga variabel, seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Flowchart* Variabel Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum membuat benda uji beton silinder yang terdiri dari beberapa bahan berupa agregat halus, agregat kasar, semen, *bentonite* dan air maka bahan-bahan tersebut diuji terlebih dahulu di Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta. Khusus untuk bahan *bentonite* diuji di Laboratorium Analitik Kimia Universitas Gadjah Mada. Data-data yang diperoleh dari berbagai pengujian baik pengujian agregat kasar maupun agregat halus serta *bentonite* disusun dan dianalisis sebagai susunan dari rangkaian penelitian.

Adapun hasil pengujian bahan-bahan yang digunakan untuk membuat benda uji yaitu: (1) Data Pengujian Bahan: (a) Pengujian Semen. Pengujian pada semen dilakukan dengan mengamati semen secara langsung. Dari pengamatan dihasilkan bahwa keadaan kemasan sak semen yang digunakan untuk membuat benda uji berada dalam keadaan utuh dan baik serta kondisi semen dalam keadaan tidak menggumpal ataupun mengeras sehingga dapat disimpulkan semen dengan merek Gresik yang digunakan dalam penelitian ini baik dan memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton. (b) Pengujian Air. Pada penelitian ini air yang digunakan yaitu air yang berasal dari Laboratorium Bahan Bangunan Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT UNY. Pengamatan dilakukan dengan cara pengamatan langsung dengan mengamati keadaan air. Dari pengamatan dapat disimpulkan bahwa air dari tersebut memenuhi persyaratan untuk campuran pembuatan benda uji beton karena air terlihat jernih serta tidak terlihat adanya kandungan lumpur, kotoran, maupun kandungan bahan kimia. (c) Pengujian Agregat Halus. Pengujian agregat halus dilakukan untuk memastikan agregat halus tersebut memenuhi persyaratan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton. Tujuan dari pengujian agregat halus untuk mengetahui data sebagai berikut: berat jenis, kadar air, kadar lumpur, modulus kehalusan butir, bobot isi, dan kandungan zat

organik (d) Pengujian Agregat Kasar. Pengujian agregat kasar dilakukan untuk memastikan agregat kasar tersebut memenuhi persyaratan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton. Tujuan dari pengujian agregat kasar untuk mengetahui data sebagai berikut: berat jenis, kadar air, kadar lumpur, bobot isi, keausan kerikil, dan modulus kehalusan butir. (e) Pengujian *Bentonite*. Pengujian *bentonite* dilakukan untuk mengetahui kandungan kimiawi *bentonite* yang terkandung di dalamnya. Pengujian *bentonite* ini dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik UGM dengan menggunakan metode *Atomic absorption spectroscopy* (AAS) dan *Gravimetry*. Pengujian nilai *slump* digunakan untuk mengetahui tingkat kelecakan suatu adukan beton, semakin tinggi nilai *slump* maka semakin mudah proses pengerjaan beton (*workability*). Dari 18 sampel beton silinder dengan penggunaan *bentonite* 10% berdasarkan variasi umur yang dilakukan dengan 3 kali pengecoran, didapat nilai *slump* sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Nilai *Slump*

Tahap Pengecoran	<i>Bentonite</i>	fas	Nilai <i>Slump</i> (mm)
1	10%	0,51	65
2	10%	0,51	35
3	10%	0,51	35

Dari hasil pengujian kuat tekan beton diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Kadar *Bentonite* 10%

No	Kode BendaUmur (hari)		Diameter (mm)		Berat Benda Uji (gr)	Beban Maksimum (kg)
	Uji		Atas	Bawah		
1	A.3.1	3	150,1	150,1	11960	32000
2	A.3.2	3	149,7	149,7	11920	33000
3	A.3.3	3	149,8	149,8	12140	33000
4	A.7.1	7	150,1	150	12000	43000
5	A.7.2	7	150,2	150	12300	40000
6	A.7.3	7	151	150	12140	40000
7	A.14.1	14	151,7	150,2	12243	68000
8	A.14.2	14	149,4	149,2	12145	69000
9	A.14.3	14	150,5	150,7	12030	64000
10	A.21.1	21	150,7	150,5	12151	64000
11	A.21.2	21	152	150,3	12282	69000
12	A.21.3	21	151	150	12183	77000
13	A.28.1	28	151,1	149,5	12132	67000
14	A.28.2	28	150,9	149,7	12325	47000
15	A.28.3	28	150,7	149,8	12153	82000
16	A.56.1	56	151	150,3	12251	87000
17	A.56.2	56	140	141	12100	74000
18	A.56.3	56	150,5	150	12137	92000

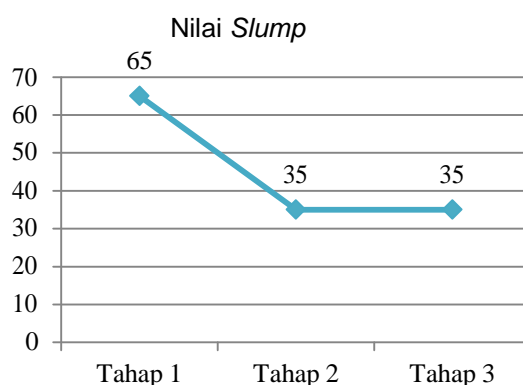
Hasil pengujian kimia *bentonite* dapat dikatakan telah memenuhi persyaratan sebagai bahan alami pozolan pengganti sebagian semen (ASTM C 618-03) untuk pembuatan benda uji, seperti yang terlihat dalam Tabel 3.

Tabel 3. Kandungan Kimia dan Hasil Pengujian *Bentonite*

Unsur kimia	Kelas N	<i>Bentonite</i>
(SiO ₂) + (Al ₂ O ₃) + (Fe ₂ O ₃), min %	70	88,3305
H ₂ O, max %	3	2,1028
LOI, max %	10	8,7245

Tetapi untuk kandungan SO_3 dalam *Bentonite* tidak bisa dilakukan pengujian karena keterbatasan, dalam hal ini adalah lembaga penelitian yang ada di kota Yogyakarta. Lembaga penelitian yang tidak bisa menguji kandungan kimia SO_3 tersebut adalah Laboratorium Kimia Analitik (UGM), Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan (BBTKL), Laboratorium Kesehatan, Laboratorium BATAN, Balai Pengembangan Teknik Pertanian (BPTP).

Workability (kemudahan pengerjaan) beton dapat dilihat dari nilai *slump* yang dihasilkan. Karena nilai *slump* merupakan parameter *workability*, semakin tinggi nilai *slump* maka semakin mudah proses pengerjaan beton (*workability*). Beton dengan penggunaan bahan tambah *Bentonite* menghasilkan nilai *slump* sebesar 65, 35, dan 35 mm. Nilai *slump* tersebut tidak sesuai dengan nilai *slump* yang direncanakan, rendahnya nilai *slump* karena adanya pengaruh bahan tambah *Bentonite* dan faktor cuaca pada saat melakukan pengecoran.



Gambar 2. Grafik Nilai Slump

Dilihat dari penggunaan *Bentonite* maka nilai *slump* yang dihasilkan kecenderungan turun dari yang direncanakan. Hal ini disebabkan bentuk butiran *Bentonite* yang sangat halus bersifat higroskopis (menyerap air bebas) sehingga mengurangi kelecakan pada beton. Higroskopis adalah kemampuan suatu zat untuk menyerap molekul air dari lingkungannya melalui absorpsi. Absorpsi merupakan salah satu operasi pemisahan dalam reaksi kimia dimana suatu campuran gas dengan suatu cairan penyerap yang sesuai, sehingga satu atau lebih komponen dalam campuran gas larut dalam cairan penyerap. Suatu zat disebut higroskopis jika zat itu mempunyai kemampuan menyerap molekul air yang baik. Dalam kaitannya menurunnya *slump* dari beton yang diganti sebagian semennya menggunakan *Bentonite* karena *Bentonite* yang berasal dari Nanggulan Kabupaten Kulon Progo berjenis kalsium. Sedangkan kalsium klorida merupakan zat yang sangat higroskopis, sehingga kalsium klorida akan larut dalam molekul-molekul air yang diresapnya.

Setelah dilakukan pembuatan dan perawatan benda uji, selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan benda uji. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada benda uji dengan variasi umur 3, 7, 14, 21, 28, dan 56 hari dengan kuat tekan yang direncanakan (f'_c) pada umur 28 hari sebesar 30 MPa sebanyak 18 sampel yang terdiri 3 beton silinder tiap variasi umur. Pengujian kuat tekan beton bertujuan untuk mengetahui berapa kekuatan beton yang dihasilkan dengan menggunakan bahan pengganti semen berupa *Bentonite* sebesar 10% dari berat semen. Berikut hasil pengujian kuat tekan beton:

Tabel 4. Hasil Pengujian Rata-rata Kuat Tekan Beton

No	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Luas (cm ²)	Beban Maksimum (kg)	Kuat Tekan / f'_c (Mpa)
1	A.3.1	3	176,899	32000	18,089
2	A.3.2	3	175,919	33000	18,758
3	A.3.3	3	176,154	33000	18,733

No	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Luas (cm ²)	Beban Maksimum (kg)	Kuat Tekan / f'c (Mpa)
			Rata-rata		18,527
4	A.7.1	7	176,625	43000	24,345
5	A.7.2	7	176,625	40000	22,646
6	A.7.3	7	176,625	40000	22,646
			Rata-rata		23,213
7	A.14.1	14	176,860	68000	38,448
8	A.14.2	14	176,884	69000	39,008
9	A.14.3	14	174,340	64000	36,709
			Rata-rata		38,055
10	A.21.1	21	175,981	64000	36,367
11	A.21.2	21	178,222	69000	38,715
12	A.21.3	21	177,411	77000	43,402
			Rata-rata		39,495
13	A.28.1	28	176,154	67000	38,034
14	A.28.2	28	176,782	47000	26,586
15	A.28.3	28	175,449	82000	46,737
			Rata-rata		37,119
16	A.56.1	56	178,040	87000	48,865
17	A.56.2	56	155,181	74000	47,686
18	A.56.3	56	177,568	92000	51,811
			Rata-rata		49,454

Dari data dapat dilihat bahwa nilai uji tekan beton menggunakan bahan pengganti semen berupa *bentonite* dengan kadar 10% dari umur 3-21 hari mengalami kenaikan nilai kuat tekan, dengan nilai kuat tekan tertinggi pada umur 21 hari sebesar 39,495 MPa. Pada umur beton 28 hari nilai kuat tekan beton mengalami penurunan sebesar 6,01% dengan kuat tekan 37,119 MPa. Sedangkan pada umur 56 hari nilai kuat tekan beton masih menunjukkan kenaikan nilai kuat tekan beton sebesar 33,23% dengan kuat tekan 49,454 MPa.

Nilai kuat tekan ini dipengaruhi oleh bahan tambah *bentonite*, dimana *bentonite* mempunyai sifat seperti pozolan. Bentuknya yang halus jika dicampur dengan semen dan air akan mengeras dalam beberapa waktu, selain itu *bentonite* berfungsi sebagai pengisi pori pada campuran beton segar *bentonite* memiliki kandungan silica (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) yang tinggi dan unsur ini akan bereaksi dengan kapur bebas (Ca(OH)₂), sehingga penggunaan *bentonite* sebagai bahan pengganti sebagian semen bisa menghasilkan kuat tekan beton maksimal. Terjadinya kuat tekan beton minimal pada umur 28 hari terjadi karena ada penambahan air sehingga pada sampel beton A.28.2 kuat tekan lebih rendah dibandingkan dengan dua sampel lainnya.

SIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan pembahasan diperoleh beberapa kesimpulan, diantaranya: (1) Kandungan kimia dalam *bentonite* yang diambil dari Desa Tanjungharjo Kecamatan Nanggulan Kabupaten Kulon Progo telah memenuhi persyaratan sebagai pozolan kelas N, F, dan C standar ASTM C 618-03. Dikarenakan unsur Silikon Oksida (SiO₂) + Aluminium Oksida (Al₂O₃) + Ferro Oksida (Fe₂O₃) di dalam *bentonite* yaitu 88,3305% > 70%,

kandungan air didalam *bentonite* yaitu $2,1028\% < 3\%$, sedangkan hilang pijar didalam *bentonite* $8,7245\% < 10\%$. (2) Adanya pengaruh variasi substitusi semen dengan *bentonite* terhadap nilai *slump* sebesar 65mm dan 35mm, hal ini dikarenakan *bentonite* memiliki sifat higroskopis (menyerap air bebas) (3) Penggantian sebagian semen menggunakan *bentonite* dengan kadar 10% menghasilkan nilai kuat tekan beton rata-rata tertinggi pada umur 56 hari sebesar 49,454 MPa dan terendah pada umur 28 hari sebesar 37,119 MPa.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Antoni dan Paul Nugraha. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi
- [2] ASTM. *ASTM C 618-03: Standard Specification for Pozzoland and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. United States: ASTM
- [3] *ASTM C 618-92a Standard Specification of Pozzolan*. United States: ASTM
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (1989). *SNI S-04-1989-F: Syarat-syarat Agregat Halus*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [5] Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-2847-2002: Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [6] Badan Standardisasi Nasional. (2004). *SNI 15-0302-2004: Semen Portland Pozzoland*.. Jakarta : Badan Standardisasi Nasional.
- [7] Kardiyono Tjokrodimuljo. (1992). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit Teknik Sipil Universitas Gajah Mada
- [8] _____. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: KMTS FT UGM
- [9] Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara. (2005). Bentonit diambil dari <http://www.tekmira.esdm.go.id/data/Bentonit/ulasan.asp?xdir=Bentonit&commId=8&comm=Bentonit> pada 21 April 2015.
- [10] Slamet Widodo. (2008). *Modul Kuliah Struktur Beton I*. Yogyakarta. Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta.
- [11] Taylor, W. H. (1977). *Concrete Technology and Practice, 4th*. McGraw-Hill.
- [12] Tri Mulyono. (2003). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi Offset