



Beton

dengan Sedikit Semen Portland dan
Tanpa Semen Portland Memanfaatkan

Abu Terbang

dari PLTU Batubara

Rulli Ranastra Irawan, Setyo Hardono, Yanu Ikhtiar Budiman,
Ogi Soeherman, Desak Nyoman Deasy Triani & Gugun Gunawan

Rulli Ranastra Irawan, Setyo Hardono, Yanu Ikhtiar Budiman,
Ogi Soeherman, Desak Nyoman Deasy Triani & Gugun Gunawan

Beton

dengan Sedikit Semen Portland dan
Tanpa Semen Portland Memanfaatkan

Abu Terbang

dari PLTU Batubara



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
www.pusjatan.pu.go.id

BETON DENGAN SEDIKIT SEMEN PORTLAND DAN TANPA SEMEN PORTLAND MEMANFAATKAN ABU TERBANG DARI PLTU BATUBARA

Rulli Ranastra Irawan
Setyo Hardono
Yanu Ikhtiar Budiman
Ogi Soeherman
Desak Nyoman Deasy Triani
Gugun Gunawan

Desember 2015

Cetakan Ke-1 2015, 88 halaman
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Foto Cover :

<http://precast.org/wp-content/uploads/2013/10/I-35-Bridge.png>
<http://i.ytimg.com/vi/JW9MsEJ3yPM/maxresdefault.jpg>

No. ISBN : 978-602-264-127-8
Kode Kegiatan : 033.11.04.2432.029.030.107
Kata kunci : Beton, Semen Portland, Abu terbang, *Fly Ash*, Batu Bara, Geopolimer

Ketua Sub Tim Teknis:

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2015 pada paket pekerjaan Inovasi Teknologi Beton dengan Sedikit dan Tanpa Semen Portland untuk Pembangunan Infrastruktur di Indonesia.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40294

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan
info@pusjatan.pu.go.id



PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PUPR dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIK & SUB TIM TEKNIK

Tim Teknis

Ir. Agus Bari Sailendra, MT.
Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc
Ir. Pantja Dharma Oetojo, M.Eng.Sc
Ir. IGW Samsi Gunarta, M.Appl.Sc
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc
DR. Drs. Max Antameng, MA
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc
Ir. George Joseph Winston Fernandez
Ir. Soedarmanto Darmonegoro
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc
Ir. Teuku Anshar
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc
Ir. Saktyanu, M.Sc
DR.Ir. Kemas Ahmad Zamhari, M.Sc
DR. Ir. Hasroel, APU
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc
DR. Ir. IF.Poernornosidhi, M.Sc
Ir. Lanneke Tristanto, APU
Ir. Saroso B.S.

Prof.(R). DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc
Ir. Joko Purnomo, MT
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc
Redrik Irawan, ST., MT.
Ir. Wawan Witarnawan, M.Sc
Dr.Ir.Slamet Mulyono
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc
Ir. Edward Pauner

Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Ir. Wawan Witarnawan, M.Sc
Ir. Abinhot Sihotang, MT.
Bernardus Herbudiman, ST., MT.
Dr.Eng. Ir. Made Suangga, MT.
Dr.tech Ir. Aswandy, MT.
Ir. Ahmad Yunaldi, MM.
Dr.Eng Ir. Fauzri Fahimuudin, M.Sc.Eng
Ir. Koesno Agus
Ir. Sumargo, M.Sc., Ph.D
Ir. Samun Haris, MT.

KATA PENGANTAR

Penggunaan tidak lepas dari penggunaan Semen Portland yang juga sebagai bahan yang mahal dan rakus energy, dimana proses produksinya membutuhkan pembakaran sampai temperatur 1500°C. Dalam beton konvensional penggunaan semen Portland menghasilkan emisi CO₂ yang setara dengan jumlah semen yang digunakan (1kg semen = 1kg CO₂). Beton konvensional yang menggunakan Portland cement terutama tipe I, memiliki sifat keawetan yang terbatas, yaitu ketahanan yang relatif rendah pada lingkungan dengan kadar asam dan garam yang relatif tinggi. Terbukti dengan banyaknya infrastruktur yang rusak akibat pengaruh lingkungan sebelum usia rencananya tercapai. Penggunaan material bersifat pozoland seperti fly ash terbukti memberikan nilai tambah pada beton dengan menurunkan tingkat penggunaan Portland cement yang secara tidak langsung menurunkan biaya, namun juga memberikan tambahan kekuatan dan keawetan akibat reaksi pozolanik yang berlangsung pada beton.

Di sisi lain industri pembangkitan listrik berbahan bakar batubara di seluruh wilayah Indonesia dalam program pemerintah 10.000 MW dan 35.000 MW memiliki masalah dengan pengelolaan *by product* berupa abu terbang (*fly ash*) bersifat pozolan yang sebenarnya secara faktual memiliki potensi untuk menggantikan semen Portland sebagai bahan utama beton, bahkan memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap struktur beton dan lingkungan. Abu terbang dikategorikan sebagai limbah B3, sehingga menyebabkan bahan tersebut kurang termanfaatkan dengan baik. Disamping itu Batu Bara di Indonesia sangat variatif dan akan menghasilkan abu terbang yang juga variatif dalam hal sifat bahan dan reaksi yang dihasilkan dalam beton. Berbagai penelitian di dalam dan luar negeri telah banyak membahas pemanfaatan abu terbang untuk beton, baik dalam bentuk High Volume Fly Ash Concrete maupun Geopolymer, namun hingga saat ini dinilai masih kurang optimal dan kurang dikenal serta masih banyak masalah yang timbul. Oleh karena itu diperlukan kegiatan penelitian yang akan berujung pada pemanfaatan (prototipe) untuk menjadi dasar pemanfaatan/pengelolaan yang tepat di Indonesia.

Inovasi Beton dengan Sedikit Semen Portland (SSP) akan memberdayakan bahan pozolan seperti abu terbang sebagai pengganti sebagian (>50%) Portland cement, sedangkan Beton Tanpa Semen Portland (TSP) akan menggantikan seluruh (100%) Portland cement yang digunakan dengan aplikasi tertentu, sehingga akan memberikan solusi terhadap berbagai permasalahan, baik lingkungan, keawetan struktur, maupun pengelolaan limbah.

Bandung, Desember 2015

Rulli Ranastra Irawan

Penyusun

DAFTAR ISI

PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATANIII

KATA PENGANTAR V

DAFTAR ISIVII

PENDAHULUAN..... 15

PEMBATASAN EMISI CO2 DALAM KEGIATAN INDUSTRI18

PEMBANGUNAN BERWAWASAN LINGKUNGAN.....19

PRODUKSI DAN KETERSEDIAAN FLY ASH.....21

TONGGAK CAPAIAN PENGGUNAAN ABU TERBANG.....25

NSPM (NORMA, STANDAR, PEDOMAN, MANUAL) TERKAIT PENGGUNAAN
ABU BATU BARA..... 26

**BETON DENGAN VOLUME PENGGUNAAN ABU TERBANG YANG TINGGI
(HIGH VOLUME FLY ASH CONCRETE / HVFAC)..... 29**

CONTOH PENERAPAN/APLIKASI HVFAC..... 35

BETON GEOPOLIMER (BETON TANPA SEMEN PORTLAND) 39

SUMBER MATERIAL PASTA GEOPOLIMER 40

FLY ASH41

LARUTAN AKTIVATOR41

NATRIUM HIDROKSIDA (NaOH)..... 42

NATRIUM SILIKAT (Na₂SiO₃) 42

SIFAT BETON GEOPOLIMER..... 43

APLIKASI BETON TANPA SEMEN PORTLAND47

PENELITIAN DI PUSJATAN TERKAIT PENGGUNAAN ABU TERBANG UNTUK BETON HVFAC DAN GEOPOLIMER51

HASIL PENGUJIAN ABU TERBANG52

HASIL PENELITIAN BETON TANPA SEMEN PORTLAND57

KOMPOSISI CAMPURAN YANG DIGUNAKAN57

HASIL PENGUJIAN MORTAR GEOPOLIMER..... 58

HASIL PENELITIAN BETON SEDIKIT SEMEN PORTLAND..... 63

KOMPOSISI CAMPURAN YANG DIGUNAKAN 63

HASIL PENGUJIAN 65

ANALISIS DAN KOMPARASI BIAYA67

KENDALA DALAM PENGEMBANGAN LEBIH JAUH 69

KESIMPULAN DAN SARAN 70

DAFTAR PUSTAKA..... 75

UCAPAN TERIMA KASIH 87

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Proporsi tipikal campuran beton HVFA dan beton konvensional (Rusjanto, 2010)..... 30

Tabel 2. Rekapitulasi hasil penelitian pemanfaatan Abu Batu Bara32

Tabel 3. Bangunan yang dibangun menggunakan High Volume Fly Ash 36

Tabel 4. Proporsi campuran beton geopolimer yang dirawat pada temperatur ruang (Sumber : Rangan et.al) 44

Tabel 5. Data beberapa PLTU di Indonesia52

Tabel 6. Tabel data XRF fly ash dari beberapa PLTU.....	53
Tabel 7. Variasi Konsentrasi NaOH.....	57
Tabel 8. Variasi Temperatur Curing.....	57
Tabel 9. Variasi Rasio Abu Terbang terhadap Aktivator.....	58
Tabel 10. Variasi Rasio Aktivator.....	58
Tabel 11. Karakteristik Bahan yang Digunakan.....	58
Tabel 12. Variasi Rasio Abu Terbang yang digunakan.....	63
Tabel 13. Variasi Sumber Abu Terbang yang digunakan.....	63
Tabel 14. Karakteristik Bahan yang Digunakan	64
Tabel 15. Harga Satuan bahan yang digunakan	67
Tabel 16. Pangsa pasar beton di Indonesia.....	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perbandingan Biaya Produksi Listrik berbagai jenis Energi Pembangkitan	16
Gambar 2. Perbandingan Komposisi Tipikal Beton dalam Penelitian	17
Gambar 3. Ilustrasi emisi CO ₂ dalam produksi semen Portland (sumber : http://www.co2crc.com.au)	18
Gambar 4. Ilustrasi gelagar beton bertulang dan gelagar baja dengan kapasitas yang sama, namun berbeda energi yang dibutuhkan (Suhendro, 2014)	19
Gambar 5. Distribusi pemakaian abu terbang pada berbagai konstruksi.....	22
Gambar 6. Rasio utilisasi abu batu bara di seluruh dunia	22
Gambar 7. Grafik Konsumsi batubara di Jepang pada tahun 2013.....	23

Gambar 8. Grafik produksi Fly Ash di Jepang pada tahun 2013.....	23
Gambar 9. Grafik pemanfaatan Fly Ash batubara pada semen di Jepang.....	24
Gambar 10. Perkembangan kekuatan dari beton HVFA dan beton konvensional, Madhavi, et.al, (2014)	31
Gambar 11. Penetrasi klorida dari beton HVFA dan beton konvensional, Madhavi, et.al, (2014).....	32
Gambar 12. Aplikasi penggunaan Fly Ash volume tinggi pada beton (A) Precast prestressed platform (B) South concrete frame	37
Gambar 13. (A) NaOH pellet, (B) Natrium Silikat (Na_2SiO_3).....	43
Gambar 14. Kuat tekan beton geopolimer yang dirawat di temperature ruang (sumber : Wallah, et.al 2006).....	45
Gambar 15. Kuat tekan beton geopolimer yang dirawat di temperature ruang (sumber : Nguyen, 2009).....	45
Gambar 16. Kondisi visual benda uji setelah satu tahun (sumber : Wallah, et.al, 2006).....	46
Gambar 17. Susut kering beton geopolimer yang dirawat dalam oven (sumber : Wallah, et.al, 2006).....	46
Gambar 18. Susut kering beton geopolimer yang dirawat pada di suhu ruang (sumber : Wallah, et.al, 2006)	47
Gambar 19. Aplikasi perkerasan kaku beton geopolimer cor ditempat (sumber : Aldred, et.al, 2012).....	48
Gambar 20. Aplikasi dinding penahan tanah beton geopolimer pracetak (sumber : Aldred, et.al, 2012).....	48
Gambar 21. Aplikasi penampung air pada beton geopolimer (sumber : Aldred, et.al, 2012).....	48
Gambar 22. Aplikasi jembatan dengan beton geopolimer (sumber : Aldred, et.al, 2012).....	49

Gambar 23. Peta lokasi PLTU di Indonesia.....	50
Gambar 24. Grafik kandungan kimia Oksida dari beberapa PLTU berdasarkan data XRF.....	53
Gambar 25. (A) SEM (Scanning Electron Microscope) Suralaya, (B) SEM (Scanning Electron Microscope) Aceh, (C) SEM (Scanning Electron Microscope) Kalimantan Timur, (D) SEM (Scanning Electron Microscope) Bayah.....	54
Gambar 26. (A) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Suralaya, (B) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Aceh.....	55
Gambar 26. - lanjutan (C) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Kalimantan Timur, (D) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Bayah.....	55
Gambar 27. Variasi Percobaan Laboratorium untuk Beton Tanpa Semen Portland.....	57
Gambar 28. Hasil Uji Tekan Mortar pada Berbagai Umur dan Variasi Konsentrasi NaOH	59
Gambar 29. Hasil SEM campuran mortar 8M, 10M, dan 14 M.....	59
Gambar 30. Hasil Uji Tekan Mortar pada Berbagai Umur dan Variasi Temperatur Perawatan.....	60
Gambar 31. Hasil SEM campuran mortar dengan variasi temperature perawatan.....	60
Gambar 32. Hasil Uji Tekan Mortar pada Berbagai Umur dan Variasi Rasio Abu terbang.....	61
Gambar 33. Hasil Uji SEM Varias campuran Mortar (A) 60 % (B) 70 % (C) 75%.....	62
Gambar 34. Variasi Percobaan Laboratorium untuk Beton Sedikit Semen Portland.....	62

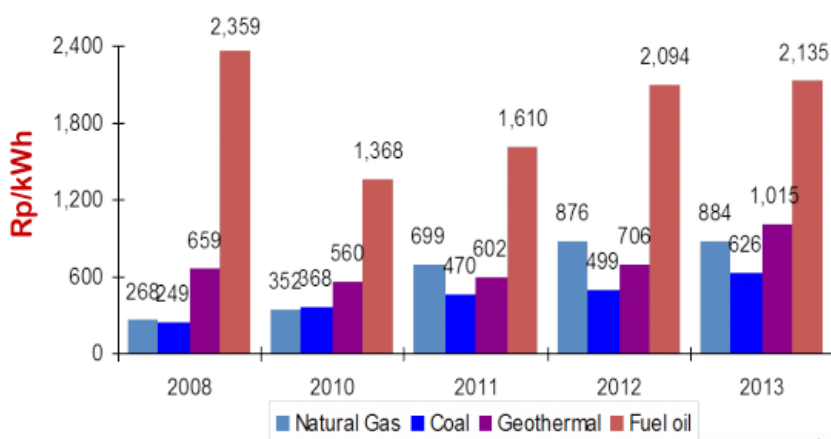
Gambar 35. Peningkatan Kuat tekan terhadap umur dengan variasi rasio abu terbang.....	64
Gambar 36. Perubahan nilai workability seiring peningkatan rasio Abu terbang.....	65
Gambar 37. Peningkatan Kuat tekan terhadap umur dengan variasi sumber abu terbang.....	66
Gambar 38. Komponen Harga beton secara tipikal	68
Gambar 39. Komponen Harga beton SSP secara tipikal	68
Gambar 40. Komponen Harga beton TSP secara tipikal.....	68
Gambar 41. Perbandingan harga bahan per m3 dengan kelas kekuatan sama	69
Gambar 42. Statistik panjang jalan di Indonesia (sumber : BPS 2009)	70

PENDAHULUAN

Beton sangat umum digunakan terutama untuk pembangunan infrastruktur dalam program MP3EI. Penggunaan tidak lepas dari penggunaan Semen Portland yang juga sebagai bahan yang mahal dan rakus energy, dimana proses produksinya membutuhkan pembakaran sampai temperatur 1500°C. Dalam beton konvensional penggunaan semen portland menghasilkan emisi CO₂ yang setara dengan jumlah semen yang digunakan (sederhananya 1kg semen \simeq 1kg CO₂). Beton konvensional yang menggunakan Portland Cement terutama tipe I, memiliki sifat keawetan yang terbatas, yaitu ketahanan yang relatif rendah pada lingkungan dengan kadar asam dan garam yang relatif tinggi. Terbukti dengan banyaknya infrastruktur yang rusak akibat pengaruh lingkungan sebelum usia rencananya tercapai. Penggunaan material bersifat pozoland seperti *fly ash* terbukti memberikan nilai tambah pada beton dengan menurunkan tingkat penggunaan portland cement yang secara tidak langsung menurunkan biaya, namun juga memberikan tambahan kekuatan dan keawetan akibat reaksi pozolanik yang berlangsung pada beton.

Di sisi lain industri pembangkitan listrik berbahan bakar batubara di seluruh wilayah Indonesia dalam program pemerintah 10.000 MW (ditambah program 35.000MW dengan 80% PLTU) memiliki masalah dengan pengelolaan by product berupa abu terbang (*fly ash*) bersifat pozolan yang sebenarnya secara faktual memiliki potensi untuk menggantikan semen Portland sebagai bahan utama beton, bahkan memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap struktur beton dan lingkungan. Kondisi di Indonesia dimana abu terbang dikategorikan sebagai limbah B3, menjadikan bahan tersebut kurang terkelola dan termanfaatkan dengan baik. Batu bara di Indonesia sangat variatif dan akan menghasilkan abu terbang yang juga variatif dalam hal sifat bahan dan reaksi yang dihasilkan dalam beton. Pemilihan pembangkit listrik sebagian besar dari PLTU batu bara adalah karena alasan optimasi dimana biaya pembangkitan dengan PLTU batubara masih menjadi teknologi yang paling murah. **Gambar 1** menunjukkan perbandingan biaya produksi listrik dari berbagai jenis energy.

Berbagai penelitian di dalam dan luar negeri telah banyak membahas pemanfaatan abu terbang untuk beton, baik dalam bentuk *High Volume Fly Ash Concrete* maupun *Geopolymer*, namun hingga saat ini dinilai masih kurang optimal dan kurang dikenal, belum teraplikasi serta masih banyak masalah yang timbul. Oleh karena itu diperlukan kegiatan penelitian yang akan berujung pada pemanfaatan/aplikasi dalam bentuk prototipe untuk menjadi dasar pemanfaatan/pengelolaan yang tepat di Indonesia.



Gambar 1. Perbandingan Biaya Produksi Listrik berbagai jenis Energi Pembangkitan
(Sumber : DJK – ESDM, 2015)

Inovasi Beton dengan Sedikit Semen Portland (SSP) akan memberdayakan bahan pozolan seperti abu terbang sebagai pengganti sebagian ($\geq 50\%$) Portland Cement (*hydration*), sedangkan Beton Tanpa Semen Portland (TSP) akan menggantikan seluruh (100%) Portland Cement (*geopolymerization*) yang digunakan dengan aplikasi tertentu, sehingga akan memberikan solusi terhadap berbagai permasalahan, baik lingkungan, keawetan struktur, maupun pengelolaan limbah.

Pemanfaatan pozolan dari proses pembangkitan listrik sebagai energy utama di Indonesia perlu didukung, sehingga akan menjadi solusi bagi sektor energy yang membutuhkan pemanfaatan *by product* dan menjadi solusi bagi sektor konstruksi yang membutuhkan termanfaatkannya bahan lokal, struktur yang awet (*durable*), tepat biaya (*cost effective*) serta berwawasan lingkungan (*environmentally friendly*). Dengan kata lain kegiatan ini bertujuan mengurangi penggunaan semen dalam beton, antara 50% sampai dengan 100%, tanpa mengurangi kinerja beton, dan mendukung pembangunan berwawasan lingkungan dengan memanfaatkan material limbah pembangkitan listrik berbahan bakar batubara untuk bahan beton. Perbandingan beton konvensional dengan beton tanpa semen atau geopolimer secara umum dari jumlah agregat (agregat halus dan kasar) tidak berbeda hanya penggunaan material semen yang digunakan dan aktifator yang paling membedakan diantara kedua jenis beton tersebut, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.

- **Beton pada Umumnya**



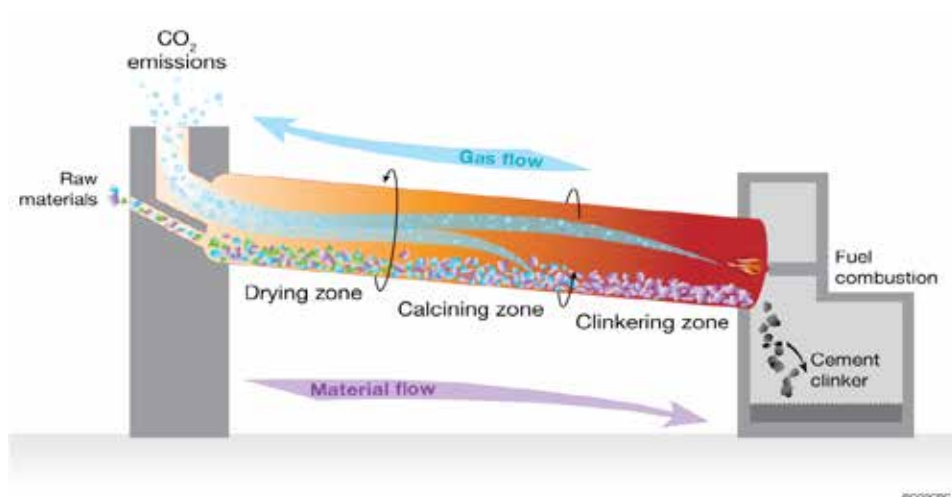
- **Beton SSP**



- **Beton TSP**



Gambar 2. Perbandingan Komposisi Tipikal Beton dalam Penelitian



Gambar 3. Ilustrasi emisi CO₂ dalam produksi semen Portland
(sumber : <http://www.co2crc.com.au>)

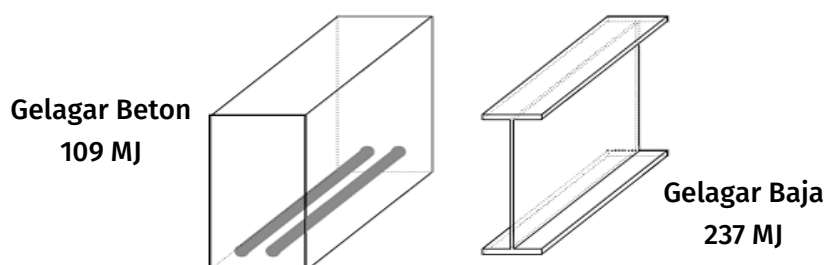
PEMBATASAN EMISI CO₂ DALAM KEGIATAN INDUSTRI

Saat ini isu lingkungan menjadi hal yang sensitif, pemanasan global, dan efek Gas Rumah Kaca (GRK) dalam bentuk CO₂ menjadi sorotan dalam berbagai industri. Salah satu komponen dari beton yaitu semen Portland, pada proses pembuatannya dapat menghasilkan gas rumah kaca. Melihat hal tersebut yang dapat kita lakukan adalah melakukan tindakan mitigasi dampak lingkungan yang salah satunya dengan meminimalkan produksi gas rumah kaca dalam setiap kegiatan konstruksi beton. Tindakan yang dapat diambil salah satunya dengan memanfaatkan teknologi beton yang lebih rendah produksi GRK-nya. Dalam melayani kebutuhan semen Portland untuk keperluan umum mayoritas produsen semen memproduksi semen Portland komposit dan sisanya memproduksi semen Portland pozzolan. Tidak diproduksi lagi Semen Portland tipe I adalah tuntutan dari protokol Kyoto dimana Protokol Kyoto adalah sebuah amandemen terhadap Konvensi Rangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (UNFCCC), yaitu sebuah persetujuan internasional mengenai pemanasan global. Negara-negara yang meratifikasi protokol ini berkomitmen untuk mengurangi emisi/pengeluaran karbon dioksida dan lima gas rumah kaca lainnya, atau bekerja sama dalam perdagangan emisi jika mereka menjaga jumlah atau menambah emisi gas-gas tersebut, yang telah dikaitkan

dengan pemanasan global. Produksi semen yang menggunakan pemanasan menjadikan industri semen sebagai salah satu penyumbang efek rumah kaca yang terbesar. Pada tahun 2012 Menteri Perindustrian juga telah menerbitkan Peraturan Menteri Perindustrian No 12/M-IND/PER/1/2012 tentang Peta Panduan (RoadMap) Pengurangan Emisi CO₂ Industri Semen. Di dalam peraturan tersebut Emisi CO₂ spesifik diturunkan secara sukarela sebesar 2% dalam kurun waktu tahun 2011 sampai dengan tahun 2015 dan diturunkan secara wajib sebesar 3% dalam kurun waktu tahun 2016 sampai dengan tahun 2020. Oleh karena itu sekarang ini semen diproduksi dengan tambahan bahan bersifat semen (*cementitious*) pada tahap sesudah pembakaran sehingga energi yang diperlukan untuk menghasilkan semen dalam kemasan menjadi lebih sedikit.

PEMBANGUNAN BERWAWASAN LINGKUNGAN

Dibandingkan dengan bahan lainnya, seperti kayu, baja, dan aluminium, beton adalah bahan yang relatif lebih ramah lingkungan. Sebagai ilustrasi, Suhendro (2014) dalam makalahnya telah membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari gelagar beton bertulang konvensional dengan profil gelagar baja dengan kapasitas penampang yang sama. Energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan balok beton bertulang diperkirakan 109 MJ dan energi untuk menghasilkan baja I-beam diperkirakan 237 MJ. Namun, karena beton diproduksi pada skala yang sangat besar di seluruh dunia, dengan konsumsi tahunan mendekati 20.000 juta metrik ton pada tahun 2009 (Suhendro, 2014), dampak yang dihasilkan terhadap lingkungan juga akan sangat besar. **Gambar 4** menunjukkan ilustrasi gelagar beton bertulang dan gelagar baja.



Gambar 4. Ilustrasi gelagar beton bertulang dan gelagar baja dengan kapasitas yang sama, namun berbeda energi yang dibutuhkan (Suhendro, 2014)

Konservasi lingkungan telah menjadi isu utama dunia dalam konteks global. Sejak Earth Summit 1997 di Kyoto Jepang, seluruh negara dituntut untuk mengurangi emisi CO₂ dalam skala besar (sebelum tahun 2010 ditargetkan emisi berkurang sekitar 21%). Industri besar di negara-negara seluruh dunia telah menyepakati untuk merumuskan peraturan yang berhubungan dengan misi pelestarian lingkungan. Sekitar 8 ~ 10% dari total emisi CO₂ dunia, yang diyakini menjadi pendorong utama perubahan iklim global, ternyata tidak berasal dari polusi kendaraan di jalan raya atau kebakaran hutan, akan tetapi berasal dari proses pembuatan semen di pabrik semen (Suhendro, 2014). Gas rumah kaca dilepaskan ketika bahan baku semen, kapur dan tanah liat digiling dan dipanaskan dalam tungku pada temperatur $\pm 1500^{\circ}\text{C}$. Setiap tahun, sekitar 1,89 miliar ton semen telah diproduksi di seluruh dunia (Suhendro, 2014) dimana semen merupakan salah satu komponen utama dari beton. Menurut Suhendro (2014), alternatif lain dalam mengurangi emisi CO₂ dapat dilakukan melalui:

- substitusi semen dengan *fly ash*,
- penggunaan blast furnace slag dari pabrik baja,
- penggunaan mikro silika,
- penggunaan bahan pozzolan dan bubuk kapur,
- berbagai jenis abu dari pembakaran sampah rumah tangga dan bahan bakar bio, dan
- penggunaan limbah kaca yang dihancurkan.

Beton yang lebih ramah lingkungan (*green concrete*) didefinisikan sebagai beton yang setidaknya menggunakan bahan limbah sebagai salah satu komponennya, atau proses produksinya tidak menyebabkan kerusakan lingkungan (Suhendro, 2014). Secara singkat, faktor kunci yang digunakan untuk mengidentifikasi apakah beton tersebut termasuk ramah lingkungan adalah:

- jumlah bahan pengganti semen portland yang digunakan,
- proses dan metode produksi, serta
- usia layan (struktur) serta dampak yang ditimbulkan selama usia layan.

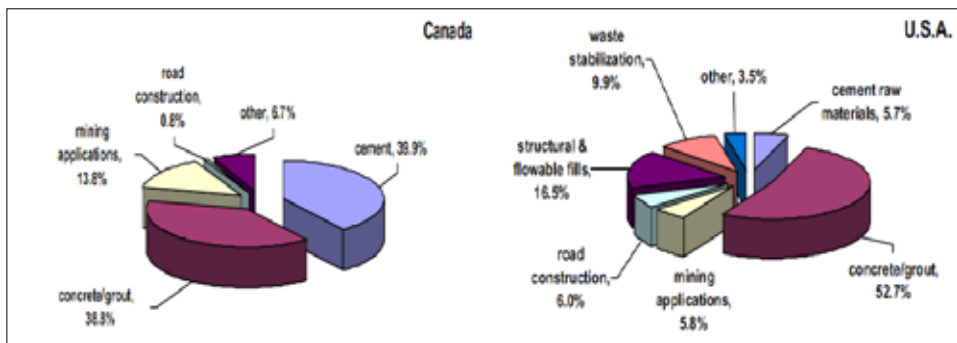
PRODUKSI DAN KETERSEDIAAN FLY ASH

Abu terbang (Fly ash) merupakan hasil sampingan dari proses pembakaran batubara pada alat pembangkit listrik. Ketersediaan abu terbang yang berlimpah saat ini, serta kondisinya sebagai material limbah membuat abu terbang menjadi salah satu material dasar pilihan untuk geopolimer. Disamping penggunaannya yang praktis (tanpa proses kalsinasi), pemanfaatannya juga sangat menguntungkan bagi lingkungan. Berdasarkan ACI Committee 226, ukuran butiran fly-ash yang lolos ayakan No. 325 (45 milimikron) berkisar 5-27%, dengan specific gravity antara 2.15-2.8. Komposisi kimia dari fly ash terdiri dari karbon yang belum terbakar, mullite, quartz dan hematite. Kandungan tersebut tergantung dari asal batu bara serta desain dari pembangkit listrik dari masing-masing PLTU (Temuujin dkk, 2009)

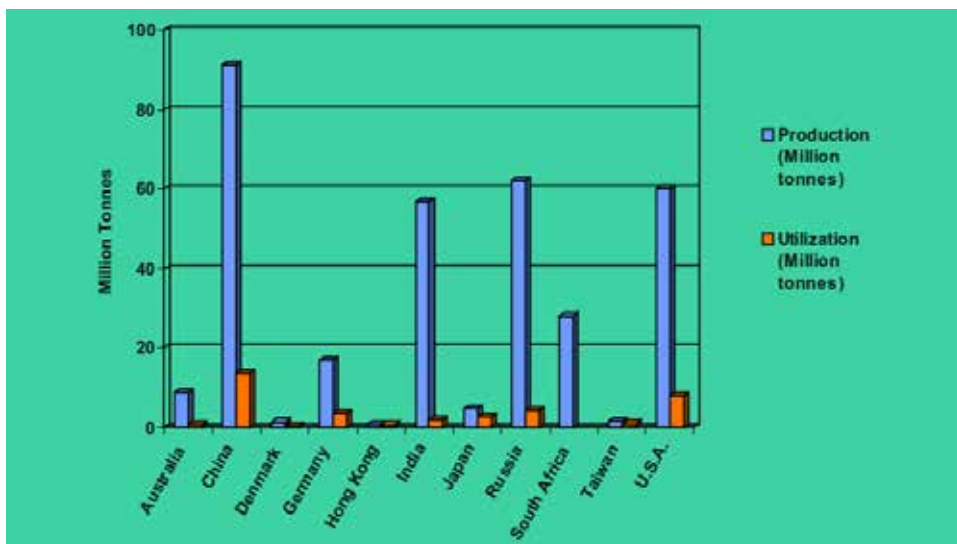
Fly ash dapat dibedakan menjadi 3 jenis (ACI Manual of Concrete Practice 1993 Part 1 226.3R-3), yaitu:

- a. Kelas C : Merupakan fly ash dengan kandungan CaO di atas 10%, yang dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batubara (batubara muda). Untuk kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) mencapai lebih dari 50% dari kandungan oksida total. Dalam campuran beton konvensional digunakan sebanyak 15% - 35% dari berat binder.
- b. Kelas F : Merupakan fly ash dengan kandungan CaO kurang dari 10%, yang dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bitumen batubara. Untuk kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) mencapai lebih dari 70% dari kandungan oksida total. Dalam campuran beton konvensional digunakan sebanyak 15% - 25% dari berat binder.

Dinegara negara maju seperti Canada dan Amerika telah banyak dilakukan pemakaian abu terbang pada pembuatan beton. Sebagai contoh sebagai pembuatan bahan konstruksi. **Gambar 5** menunjukkan bahwa sebagian besar pemakaian abu terbang telah dilakukan sebagai bahan konstruksi beton yaitu 38,8% di Canada dan 52,7% di Amerika. Hasil produksi dan pemakaian abu terbang di tiap Negara yang menghasilkan jumlah produksi abu terbang yang jauh melebihi jumlah penggunaannya (**Gambar 5**). Selain itu kita bisa lihat **Gambar 6** pemakaian batubara di beberapa Negara di dunia, bahwa produksi



Gambar 5. Distribusi pemakaian abu terbang pada berbagai konstruksi di Canada dan USA (Sumber: Lambrous and Androus, Ryerson University)

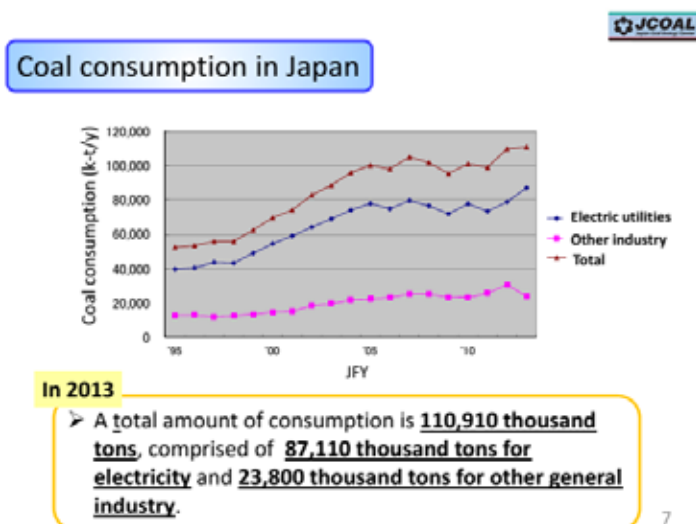


Gambar 6. Rasio utilisasi abu batu bara di seluruh dunia (Sumber: Lambrous and Androus, Ryerson University)

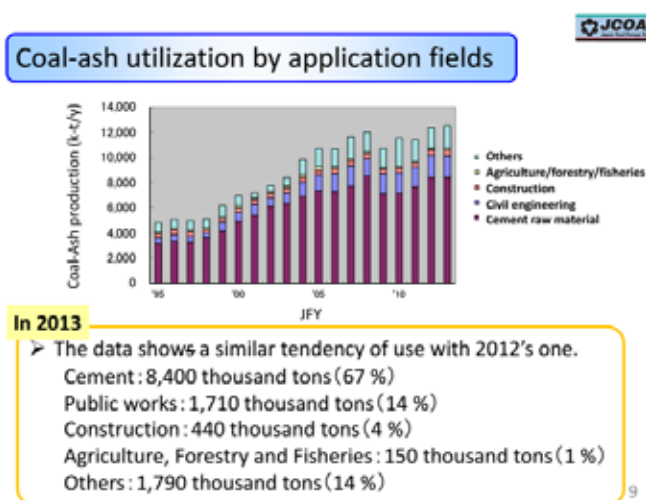
batubara di beberapa Negara sangat besar, sedangkan pemakaiannya masih sedikit.

Di negara maju seperti Jepang konsumsi penggunaan batubara pada tahun 2013 mencapai 110,910 ton dengan rincian untuk keperluan tenaga listrik Jepang membutuhkan 87,110 ton, untuk keperluan lain dan industri 23,800 ton. Dari penggunaan batubara tersebut menghasilkan limbah Fly Ash yang tentu

saja menimbulkan masalah tersendiri dalam penyelesaiannya, namun Jepang dapat memanfaatkan limbah pembakaran batubara untuk dimanfaatkan di bidang konstruksi, khususnya untuk bahan semen seperti ditunjukkan pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.

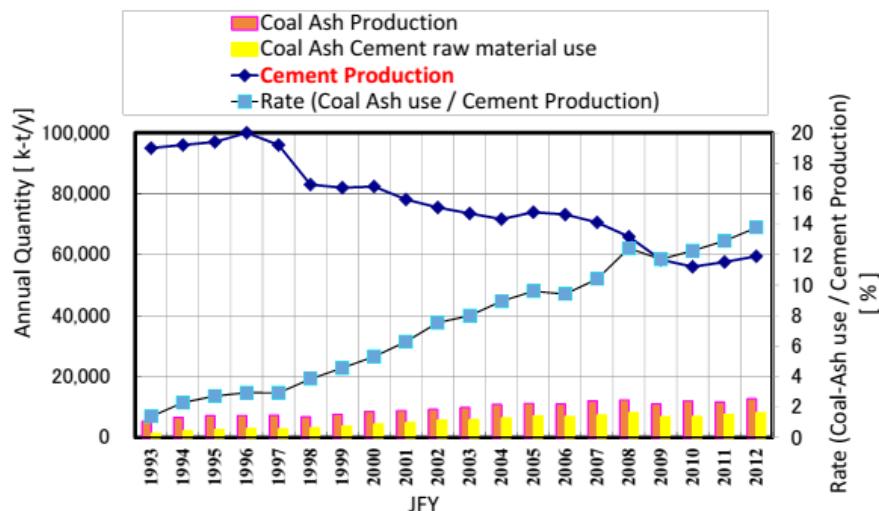


Gambar 7. Grafik Konsumsi batubara di Jepang pada tahun 2013
(sumber : JCoal 2013)



Gambar 8. Grafik produksi Fly Ash di Jepang pada tahun 2013
(sumber : JCoal, 2013)

Coal-Ash Effective Utilization (in Cement)



Gambar 9. Grafik pemanfaatan Fly Ash batubara pada semen di Jepang
(Sumber : JCoal)

Di Indonesia sendiri, khususnya di Jawa Timur sekitar satu juta ton fly ash diproduksi setiap tahunnya, dan sekitar 40% umumnya dijual untuk digunakan dalam beton atau produksi akhir lainnya. Hanya lebih dari setengah fly ash diproduksi di Jawa Timur adalah Fly Ash Kelas F, sedangkan 25% dari abu terbang kelas F saat ini dijual atau digunakan dan hampir 60% dari abu kelas C dijual dan digunakan. Kuantitas penggunaan fly ash pada beton umumnya berkisar antara 15 hingga 30 persen penggantian semen Portland. Diperkirakan oleh perwakilan industri di Jawa Timur, rata-rata, mengandung 10 sampai 15 persen pengganti fly ash. Beberapa fly ash ini digunakan untuk tujuan stabilisasi. Jika semua fly ash yang dijual di Jawa Timur pada tahun 2000 digunakan dalam produksi beton, diperkirakan bahwa sekitar 30 persen penggantian semen Portland dengan fly ash dalam produksi beton. Penggunaan aktual dalam beton sekitar 15 persen seperti yang diperkirakan oleh perwakilan industri, maka dapat disimpulkan bahwa sekitar setengah dari fly ash yang dijual (atau 20 persen dari yang diproduksi) di Jawa Timur digunakan dalam produksi beton di Jawa Timur.

TONGGAK CAPAIAN PENGGUNAAN ABU TERBANG

Penggunaan abu terbang dalam beton dimulai di Amerika Serikat pada awal 1930-an. Penelitian komprehensif pertama yang dilakukan pada tahun 1937, oleh RE Davis di University of California (Kobubu, 1968; Davis et al., 1937). Terobosan besar dalam menggunakan fly ash pada beton adalah konstruksi Hungry Horse Dam pada tahun 1948. Sekitar 120.000 ton metrik beton dengan memanfaatkan abu terbang digunakan untuk pembangunan Dam ini.

Jumlah substitusi fly ash tergantung pada komposisi kimia dari fly ash dan semen portland. Saat ini, di Amerika dan India memungkinkan substitusi maksimum dalam kisaran 15 sampai 25 persen. Hal ini sesuai dengan spesifikasi dari Departemen Perhubungan negara dan tempat lain yang membatasi tingkat penggantian fly ash sebesar 25% atau kurang, secara massal.

Pada tahun 1985, Pusat Mineral dan Energi Teknologi (CANMET) di Canada memulai studi pada beton struktural menggabungkan volume tinggi (> 50 persen) abu terbang (Malhotra dan Ramezaniapour, 1994). Penelitian ini menghasilkan HVFA beton dengan kekuatan yang memadai pada usia awal dan kemampuan kerja, kenaikan suhu rendah, dan kekuatan akhir pada usia tinggi. Selain itu Naval AS Facilities Engineering Command (NAVFAC) baru-baru ini telah mengembangkan formulasi beton HVFA dimana 50% dari semen portland diganti dengan fly ash secara massal.

Pada pembangunan proyek seperti gedung sekolah digunakan fly ash sebesar 50%, bahkan untuk "Roller Compacted Concrete Dam" penggantian tersebut mencapai telah mencapai 70 % dengan bahan Pozzocrete (fly ash yang diproses) pada "The Ghatghar Dam Project" di Maharashtra India. Fly ash juga dapat meningkatkan workability dari semen dengan berkurangnya pemakaian air (Wardani, 2008). Untuk beton dengan kemampuan mengalir dan aplikasi kepadatan rendah, campuran HVFA sampai dengan 90% fly ash telah dikembangkan. Perlu dicatat bahwa untuk abu terbang yang sangat reaktif, adalah mungkin untuk menghasilkan beton dengan 100% fly ash, seperti yang didokumentasikan oleh Palang et al. dan seperti yang digunakan dalam produk komersial tertentu.

NSPM (NORMA, STANDAR, PEDOMAN, MANUAL) TERKAIT PENGGUNAAN ABU BATU BARA

Indonesia khususnya melalui kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat telah mengenal dan menguasai teknologi pemanfaatan abu terbang dari batu bara, dibuktikan dengan telah diterbitkannya beberapa NSPM yang terkait dengan pemanfaatan dan pengelolaan terkait dengan bidang konstruksi dan infrastruktur. Beberapa NSPM yang dimaksud adalah sebagai berikut.

- SNI 6867 Spesifikasi abu terbang dan pozolan lainnya untuk digunakan dengan kapur
- SNI 2460:2014 Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton
- SNI 03-6863-2002 Metode pengambilan contoh dan pengujian abu terbang atau pozolan alam sebagai mineral pencampur dalam beton semen portland
- SNI 03-6468-2000 Tata cara perencanaan campuran beton berkekuatan tinggi dengan semen portland dan abu terbang
- Pedoman Perencanaan Bubur Aspal Emulsi
- Pedoman Perencanaan Perkerasan Beton Semen

Secara khusus, penggunaan abu terbang di Indonesia diatur di dalam Undang-undang dan Peraturan pemerintah yaitu :

- Undang-undang Nomor 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Peraturan Pemerintah Nomor 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Berbahaya dan Beracun.

Selain itu pemanfaatan abu batu bara juga terkait beberapa peraturan lain seperti

- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2004 Tentang Pengesahan Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change (Protokol Kyoto Atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa Tentang Perubahan Iklim).

- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2011 Tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca.

Sehingga kegiatan pengelolaan dan pemanfaatan abu batu bara merupakan suatu hal yang cukup strategis. Namun sampai saat ini belum seluruh kelengkapan peraturan perundangan tersebut tersedia, sehingga masih banyak terjadi kendala dalam pengelolaannya terutama dalam hal pemanfaatannya, oleh karena itu hal ini menjadi tugas bersama yang harus segera diselesaikan. ■

BETON DENGAN VOLUME PENGGUNAAN ABU TERBANG YANG TINGGI (*HIGH VOLUME FLY ASH CONCRETE*)

Sejak tahun 80'an, CANMET telah mengembangkan beton kinerja tinggi dengan menggunakan *fly ash* dalam volume pada campuran beton yang lebih tinggi, namun beton yang dihasilkan memiliki sifat mekanik, permeabilitas, dan daya tahan yang baik. Dalam makalahnya, Rusjanto, (2010) menyampaikan bahwa karakteristik tipikal dari HVFAC adalah:

1. Penggunaan minimal 50% sampai 60% fly ash kelas F (ASTM) terhadap total bahan semen.
2. kadar air yang rendah rendah, umumnya $\leq 130 \text{ kg/m}^3$ beton.
3. Kadar semen Portland tidak lebih dari 200 kg/m^3 beton.
4. Dosis *superplasticizer* yang sangat rendah, jika diperlukan untuk mencapai nilai slump mulai dari 150 hingga 200 mm.

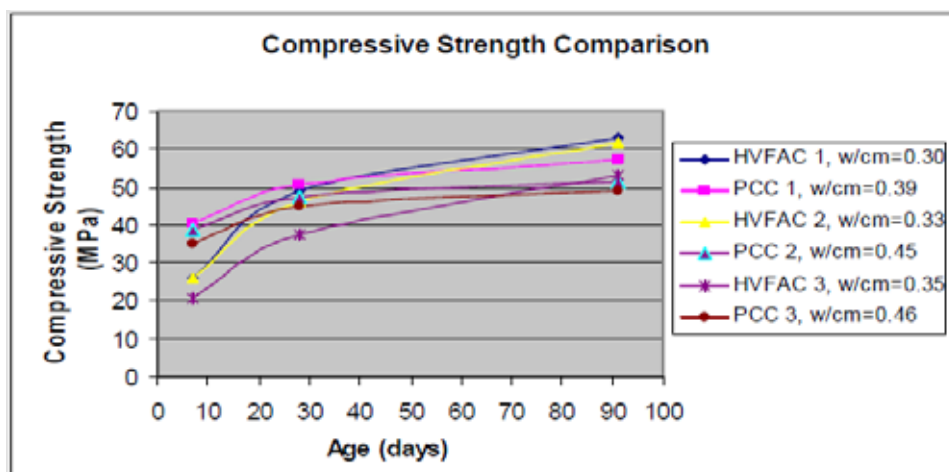
5. Rasio air-semen yang rendah, w/cm, umumnya kurang dari 0,35. Proporsi campuran secara tipikal untuk beton HVFA dan beton konvensional, (Rusjanto, 2010) ditunjukkan pada **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Proporsi tipikal campuran beton HVFA dan beton konvensional (Rusjanto, 2010)

Typical mixture proportions, kg/m ³				
HIGH PERFORMANCE HVFA CONCRETE				PC CONCRETE
Material component	Low-strength 20 MPa	Moderate-strength 30 MPa	High-strength 40 MPa	25 MPa
Water	120 to 130	115 to 125	115 to 120	178
ASTM Type I / Type II Cement	125 to 130	155 to 160	180 to 200	307
ASTM Class F Fly Ash	125 to 130	215 to 220	220 to 225	
Coarse aggregate (19 mm maximum)	1170 ± 10	1200 ± 10	1110 ± 10	1040
Fine aggregate	800 ± 10	750 ± 10	750 ± 10	825
Total	2380	2475	2425	2350
w/cm	0.5	0.33	0.28	0.58

Menurut Madhavi, et.al, (2014), karena menggunakan rasio air semen yang rendah, penggunaan *superplasticizer* atau HRWR sangat penting untuk memastikan kemampuan kerja. Peningkatan kadar *fly ash* meningkatkan kemampuan kerja bila dibandingkan dengan beton konvensional dengan kadar air yang sama. Bentuk bulat dan distribusi ukuran partikel *fly ash* meningkatkan fluiditas beton dan dengan demikian kebutuhan air dalam campuran berkurang, sehingga berkontribusi terhadap kekuatan jangka panjang.

Peningkatan kuat tekan tergantung pada volume semen yang disubstitusi, usia beton dan jenis flyash (Madhavi, et.al, 2014). Kuat tekan yang lebih tinggi pada usia yang lebih besar menjadi keunggulan pada saat *fly ash* kelas F digunakan karena kontribusi reaksi *pozzolanic* jangka panjang. Semakin tinggi kekuatan pada usia yang lebih besar juga karena pori-pori kapiler kecil dan mikro akan menjadi padat akibat reaksi pozzolan. Oleh karena itu waktu perawatan (*curing*) yang cukup minimal 7 hari (Madhavi, et.al, 2014), adalah penting untuk memastikan bahwa perkembangan kekuatan akan terjadi.



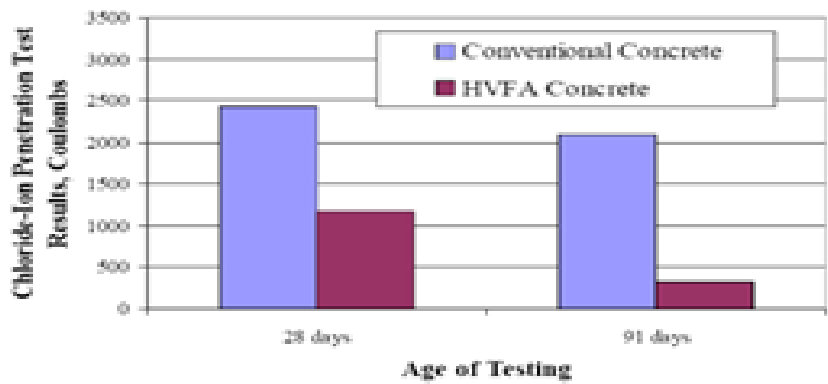
Gambar 10. Perkembangan kekuatan dari beton HVFA dan beton konvensional, Madhavi, et.al, (2014)

Komparasi perkembangan kekuatan yang dihasilkan dari beton HVFA dan beton konvensional juga disampaikan dalam **Gambar 10**.

Karena kadar semen yang rendah pada beton HVFA dan reaksi yang lambat dari *fly ash*, waktu pengikatan beton akan meningkat. Pada umumnya waktu pengikatan untuk beton HVFA lebih tinggi dari beton konvensional sekitar 2 – 20 jam. Hal semacam ini mudah dimengerti karena semen portland berkurang, sehingga reaksi terjadi pada tingkat yang lebih lambat.

Permeabilitas jangka panjang dari beton HVFA juga sangat rendah. Madhavi, et.al, (2014), telah melaporkan bahwa permeabilitas HVFA jauh lebih kecil, meskipun kekuatan beton HVFA di 28 hari lebih kecil dari beton konvensional. Demikian pula dengan permeabilitas klorida yang lebih rendah sehingga meminimalkan resiko korosi pada tulangan.

Penelitian-penelitian yang telah dilaksanakan di berbagai negara terkait dengan pemanfaatan abu terbang dalam jumlah besar (HVFA) sebagai pengganti semen Portland, berkisar 50 - 70% dari massa semen. Untuk aplikasi beton telah mulai dilaksanakan dan dilaporkan memberikan hasil yang menjanjikan. Rekapitulasi hasil penelitian pemanfaatan *fly ash* dapat dilihat pada **Tabel 2**.



Gambar 11. Penetrasi klorida dari beton HVFA dan beton konvensional, Madhavi, et.al, (2014)

Tabel 2. Rekapitulasi hasil penelitian pemanfaatan Abu Batu Bara

No.	Peneliti	Penambahan abu terbang optimum	Kuat Tekan	Jenis Beton
1	Metha, 1999	60 %	55 – 80 MPa (28 & 182 hari)	-
2	Sahmaran, dkk (2009)	70 %	33 - 40 MPa (28 hari)	SCC
3	Salain, dkk, 2011	60 %	35,70 Mpa (90 hari)	Normal
4	Ekasanti, dkk (2014)	70 %	-	SCC
5	Umboh (2014)	30 %	24,18 MPa (28 hari)	Normal
6	Soman dan Sobha (2014)	60 %	-	Normal

Adapun beberapa penelitian yang berhubungan dengan pemanfaatan fly ash dengan jumlah besar antara lain:

1. Studi yang dilakukan oleh Malhotra dengan campuran beton superplasticized menunjukkan bahwa, ketika perbandingan air / semen sebesar 0,3 atau kurang, hingga 60 persen semen dapat diganti dengan fly ash Kelas F atau Kelas C (ASTM C 618) untuk mendapatkan kekuatan dan daya

tahan karakteristik yang sangat baik. Kuat tekan yang dihasilkan pada umur 28 hari dan 182 hari masing – masing sebesar 55 MPa dan 80 MPa. Dari tes laboratorium, disimpulkan bahwa Modulus elastisitas, creep, penyusutan, dan pembekuan dan pencairan dari karakteristik volume tinggi fly ash (HVFA) beton sebanding dengan beton semen portland normal. Dilaporkan pula bahwa volume tinggi fly ash beton menunjukkan resistensi yang sangat tinggi untuk peresapan air dan penetrasi ion klorida. Temuan ini cukup penting dari sudut pandang daya tahan struktur termasuk pengendalian korosi tulangan baja pada beton yang terkena lingkungan klorida. Oleh karena itu, beton HVFA akan menjadi nilai penggunaan tambahan fly ash terbaik dalam industri konstruksi (Metha, 1999).

2. Sahmaran, dkk (2009) melakukan penelitian mengenai penggunaan High Volume Fly Ash pada beton SCC. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku mekanika dari beton SCC setelah mengeras. Fly ash yang digunakan berisi lima kandungan berbeda sebagai pengganti semen. Kandungan fly digunakan sebesar 30%, 40%, 50%, 60% dan 70% dari berat total bahan semen. Pengujian beton keras dilakukan sampai benda uji berumur 1 tahun. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggantian semen sebesar 70% dengan fly ash selain meningkatkan kemampuan kerja dan kemampuan mengalir, juga menghasilkan kuat tekan beton antara 33 sampai dengan 40 MPa untuk umur 28 hari. Hasil ini melebihi kuat tekan beton nominal untuk beton normal sebesar 30 MPa.
3. Pemanfaatan abu terbang dalam jumlah besar dalam pembuatan beton dilakukan oleh Salain, dkk, 2011. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kuat tekan beton yang dibuat dengan menggunakan abu terbang sebanyak 0%, 50%, 55%, dan 60% sebagai pengganti semen Portland. Benda uji yang digunakan adalah benda uji berbentuk kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm. Beton dirancang dengan menggunakan perbandingan berat yang konstan antara semen : agregat halus : agregat kasar sebesar 1,0 : 2,0 : 3,0 dengan nilai faktor air perekat (FAP) ditetapkan sebesar 0,35. Untuk memudahkan dalam pengerjaan beton, saat pencampuran ditambahkan superplastisizer (SPS) sebesar 1,5% dari berat perekat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa beton yang dibuat

dengan menggunakan abu terbang sebanyak 50%, 55% dan 60% sebagai pengganti semen Portland tipe I mampu mengembangkan kuat tekan sebesar berturut-turut 105%, 90% dan 85% dari kuat tekan beton yang dibuat dengan 100% semen Portland tipe I, yang besarnya 35,70 Mpa, pada umur 90 hari.

4. Ekasanti, dkk (2014) melakukan penelitian mengenai pemanfaatan fly ash dengan volume tinggi (*High Volume Fly Ash*) pada beton SCC (*Self Compacting Concrete*). Penelitian ini menggunakan semen tipe I (OPC) dan fly ash tipe C yang diperoleh dari PLTU Cilacap. Besarnya fly ash yang digunakan untuk menggantikan sebagian semen adalah dalam rentang 50% sampai dengan 70%. Pengujian beton keras dilakukan terhadap kuat tekan silinder beton pada umur 7 hari, 28 hari, 56 hari, dan 90 hari, Dari hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari, 56 hari, dan 90 hari menunjukkan bahwa kuat tekan beton tertinggi terdapat pada kadar fly ash 70%. Hal ini disebabkan penambahan kadar fly ash dalam jumlah yang banyak dapat mempertahankan faktor air semen (fas) dalam kondisi yang rendah, maka kuat tekan beton yang dihasilkan semakin meningkat.
5. Umboh (2014) melakukan penelitian mengenai pengaruh pemanfaatan fly ash sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton normal. Peneliti menggunakan abu terbang kelas C yang berasal dari PLTU II Sulawesi Utara. Komposisi variasi penambahan abu terbang (fly ash) sebanyak 0%, 30%, 40%, 50%, 60% dan 70% dari berat semen. Benda uji yang digunakan adalah berbentuk silinder, yang diuji pada umur 7, 14, 21 dan 28 hari. Penelitian ini menguji beton dengan benda uji silinder (diameter 100 mm dan tinggi 200 mm) sebanyak 96 sampel dan terdiri dari 6 variasi konsentrasi abu terbang pada pengujian 7, 14, 21, 28 hari dan masing-masing variasi sebanyak 16 sampel. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan persentase abu terbang (fly ash) sebesar 30%, 40%, 50%, 60%, 70% memiliki nilai kuat tekan tertinggi pada presentase abu terbang (fly ash) 30% yaitu sebesar 24,18 MPa untuk umur beton 28 hari. Dan nilai kuat tekan terendah pada presentase abu terbang (fly ash) 70% yaitu sebesar 3,645 MPa untuk umur beton 7 hari.

Penelitian mengenai pemanfaatan fly ash sebagai bahan substitusi semen dilakukan oleh Soman dan Sobha (2014). Peneliti menggunakan semen OPC dan fly ash yang berasal dari HI-TECH Fly Ash (India) Private Limited, Tuticorin. Campuran percobaan dibuat dengan 20%, 30%, 40%, 50% dan 60% penggantian semen dengan fly ash. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 28, 56 dan 90 hari menggunakan benda uji berbentuk kubus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan awal beton dengan substitusi fly ash lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa substitusi fly ash. Pada 28 hari kekuatan beton fly ash adalah mirip dengan campuran kontrol. Hasil pengujian pada umur 56 dan 90 hari menunjukkan bahwa ada peningkatan yang signifikan dalam kekuatan beton setelah 28 hari. Dilaporkan pula bahwa beton dengan campuran fly ash sebesar 50% dengan OPC adalah 24% lebih murah daripada OPCC. Sehingga penelitian ini menyimpulkan bahwa fly ash dapat digunakan dengan cara yang produktif dan berkontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan.

CONTOH PENERAPAN HVFAC

Pemanfaatan fly ash pertama kali sebagai bahan perkerasan beton dilakukan di Wisconsin pada tahun 1970. Di Kanada sendiri pada tahun 1987, pemanfaatan fly ash dimulai dengan pembuatan dasar beton untuk pengujian komponen satelit komunikasi, selain itu pembuatan kolom, balok, dan pelat lantai perkantoran dilakukan pada tahun 1988, serta pengecoran pondasi caisson untuk dermaga pada tahun 1990 (Metha). Penggunaan high volume fly ash dalam konstruksi beton massa dilakukan di negara Georgia sebagai pondasi. Bangunan massa dengan dimensi 3,5 feet x 125 feet x 178 feet dibangun dengan menggunakan fly ash sebesar 65% dari berat semen. Bangunan tersebut adalah Shree Swaminarayan Mandir and Culture Complex. Dilaporkan pula bahwa penggunaan fly sebesar 65% diperoleh kuat tekan sebesar 60 MPa pada umur 90 sampai dengan 1 tahun (Metha, 2004 dalam Haynes).

Tabel 3. Bangunan yang dibangun menggunakan High Volume Fly Ash

No	Nama Bangunan	Kelas Abu Terbang	Volume yang digunakan	Jumlah Semen	Mutu Beton
				(Kg/m ³)	(MPa)
1	Concrete blok untuk satelit komunikasi di Ottawa - Kanada*	Kelas F	193 (Kg/m ³)	151	46 (91 hari)
2	Landasan parkir di komplek hotel dan perkantoran, Haliarx Canada (1988) *	Kelas F	220 (Kg/m ³)	180	50 (120 hari)
3	Tempat kerja pekerja seni, Vancouver Canada (2001) *	Kelas F	195 (Kg/m ³)	195	41 (28 hari)
4	Peningkatan struktur tahan gempa Barker Hall University of California Berkeley USA (2001) *	Kelas F	197 (Kg/m ³)	160	38 (28 hari)
5	Perkerasan jalan beton, Punjab India (2002) *	Kelas F	225 (Kg/m ³)	225	41 (28 hari)
6	Brentwood Station**	-	20%–50%	-	-
7	Gilmore Station**	-	20%–50%	-	-
8	Hiranandani, Mumbai India**	-	30%–50%	-	-
9	Delhi Metro Rail, India**	-	30%	-	-

Sumber: * Solikin (2011) dalam Umboh, 2014)

**Ranganath. *High Volume Fly Ash Concrete*. Lecture-7. VTU Learning.

Rekapitulasi penggunaan High Volume Fly Ash (HVFA) yang digunakan dalam konstruksi bangunan dapat dilihat pada **Tabel 3**, sedangkan aplikasinya dapat dilihat pada **Gambar 12**. ■



Gambar 12. Aplikasi penggunaan Fly Ash volume tinggi pada beton
(A) Precast prestressed platform (B) South concrete frame

BETON GEOPOLIMER (BETON TANPA SEMEN PORTLAND)

Ilustrasi geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978 untuk menggambarkan jenis pengikat mineral yang memiliki komposisi kimia menyerupai zeolit tetapi memiliki mikrostruktur yang amorf atau kristal. Bentuk geopolimer dapat berupa kristal atau amorf tergantung dari temperatur kondensasinya, polimer yang amorf dapat dibentuk pada suhu 20°C - 90°C , sedangkan untuk kristalisasi polimer didapat pada suhu 150°C - 200°C dengan bentuk strukturnya serupa dengan zeolite A (R. Coffi dkk, 2003). Proses geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia dari alumina-silikat oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al (R. Cioffi dkk, 2003). Secara umum geopolimer bisa disintesis oleh aktivator alkali jika bereaksi dengan material yang kaya akan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 .

Ada persamaan antara material geopolimer dan semen, yaitu kedua zat memiliki sifat tahan air setelah mengeras, dan hal tersebut merupakan sifat dari bahan pengikat. Hal tersebut

menunjukkan bahwa material geopolimer dapat dipergunakan sebagai bahan pengganti semen. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, ditemukan bahwa beton geopolimer memiliki beberapa karakteristik unggulan dibandingkan beton konvensional. Karakteristik tersebut diantaranya adalah ketahanan terhadap asam dan korosi yang baik dibanding dengan beton konvensional biasa, kemudian ketahanan terhadap suhu tinggi yang baik (tahan terhadap api), memiliki kekuatan awal yang tinggi, serta penyusutan yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional, (Davidovits, 1991). Material dasar geopolimer biasanya kaya akan mineral silikon dan alumina. Material tersebut dapat berupa mineral alami seperti kaolin, tanah liat, *clay* atau lempung dan lainnya yang memiliki rumus empiris Si, Al dan O (Davidovits dalam Dian Adisty, 2009). Saat ini, material dasar geopolimer mulai dikembangkan dari produk sampingan seperti *silika fume*, *fly ash*, *rice-husk ash*, *slag*, dan lainnya. Beberapa faktor yang dipertimbangkan dalam pemilihan material diantaranya adalah biaya, asal, kebutuhan spesifik dari pemakaian akhir serta aspek terhadap lingkungan (Davidovits, 1994).

Dalam geopolimer, proses polimerisasi melibatkan reaksi kimia dalam kondisi yang sangat basa/alkali, dimana mineral Al-Si, menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al-O seperti yang disampaikan oleh Davidovits (2002). Rangan, et.al menyampaikan bahwa model struktural bahan geopolimer masih dalam penyelidikan, sehingga mekanisme yang tepat mengenai pengikatan geopolimer dan pengerasan pada geopolimer terjadi belum jelas. Kekuatan geopolimer tergantung pada sifat bahan yang digunakan.

SUMBER MATERIAL PASTA GEOPOLIMER

Pasta geopolimer yang terbuat dari bahan-bahan sumber, seperti metakaolin, fly ash, slag, dan lain lain, akan menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan geopolimer yang disintesis dari bahan *non-calcined*, seperti kaolin *clay* (Rangan, et.al). Aleem, et.al (2012) menyampaikan bahwa konstituen dari pasta Geopolimer adalah :

- Fly Ash yang kaya akan Silica dan Aluminium
- Natrium Hidroksida atau Kalium Hidroksida
- Natrium Silikat atau kalium silikat

FLY ASH

Salah satu material yang banyak digunakan sebagai material dasar geopolimer adalah abu terbang (*fly ash*). Abu terbang (*Fly ash*) merupakan hasil sampingan dari proses pembakaran batubara pada alat pembangkit listrik. Ketersediaan abu terbang yang berlimpah saat ini, serta kondisinya sebagai material limbah membuat abu terbang menjadi salah satu material dasar pilihan untuk geopolimer. Disamping penggunaannya yang praktis (tanpa proses kalsinasi), pemanfaatannya juga sangat menguntungkan bagi lingkungan. Berdasarkan ACI Committee 226, ukuran butiran *fly-ash* yang lolos ayakan No. 325 (45 milimikron) berkisar 5-27%, dengan spesifik gravity antara 2.15-2.8. Komposisi kimia dari fly ash terdiri dari karbon yang belum terbakar, *mullite*, *quartz* dan hematite. Kandungan tersebut tergantung dari asal batu bara serta desain dari pembangkit listrik dari masing-masing PLTU (Temuujin dkk, 2009)

Fly ash dapat dibedakan menjadi 3 jenis (ACI *Manual of Concrete Practice* 1993 Part 1 226.3R-3), yaitu:

- a. Kelas C : Merupakan fly ash dengan kandungan CaO di atas 10%, yang dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batubara (batubara muda). Untuk kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) mencapai lebih dari 50% dari kandungan oksida total. Dalam campuran beton konvensional digunakan sebanyak 15% - 35% dari berat binder.
- b. Kelas F : Merupakan fly ash dengan kandungan CaO kurang dari 10%, yang dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bitumen batubara. Untuk kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) mencapai lebih dari 70% dari kandungan oksida total. Dalam campuran beton konvensional digunakan sebanyak 15% - 25% dari berat binder.

LARUTAN AKTIVATOR

Larutan aktivator yang biasa digunakan dalam geopolimerisasi adalah kombinasi dari natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat atau kalium silikat (Rangan, 2008).

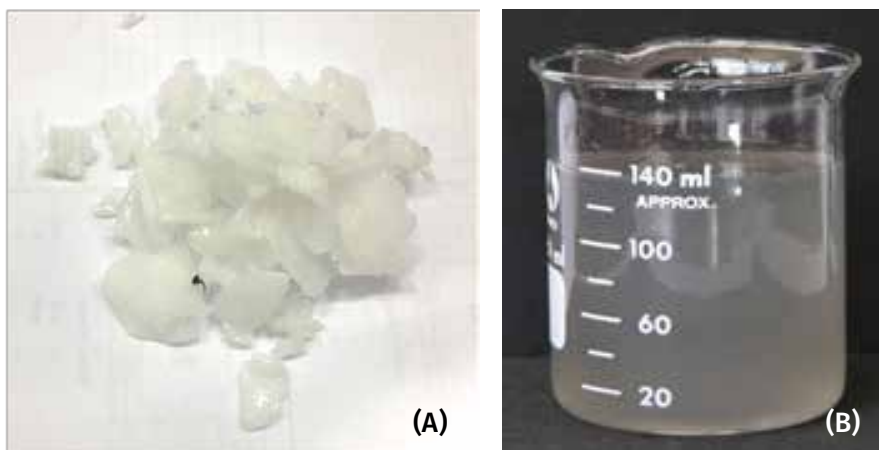
NATRIUM HIDROKSIDA (NAOH)

NaOH tersedia dalam 2 bentuk, yaitu berupa flek (serpihan) atau cair. Senyawa ini merupakan senyawa yang paling murah dan mudah didapat di antara senyawa logam hidroksida lainnya. Natrium hidroksida (NaOH) adalah senyawa yang biasa digunakan sebagai aktivator dalam sintesis geopolimer. Senyawa tersebut dapat digunakan untuk mengaktivasi abu terbang yang digunakan sebagai prekursor geopolimer. Larutan NaOH pekat memiliki sifat korosif sehingga penanganannya harus sesuai. Penambahan silikat menjadi salah satu cara penanganan sifat korosif NaOH (Provis et. all 2009). Molaritas NaOH yang biasa digunakan pada beberapa penelitian berkisar dari 6 M – 15 M. Pada prinsipnya, semakin tinggi molaritas NaOH, maka kekuatan mekaniknya akan semakin baik. Namun hal tersebut tergantung dari material dasar yang digunakan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material fly ash memiliki kekuatan mekanik yang baik seiring meningkatnya molaritas NaOH yang dipergunakan. (Adam dkk, 2009).

NATRIUM SILIKAT (Na₂SiO₃)

Sodium Silikat (Na₂SiO₃) atau yang lebih lazim dikenal dengan istilah water-glass merupakan salah satu senyawa turunan silika yang terbilang cukup melimpah di Indonesia. Bahan baku pembuatan sodium silikat pada umumnya menggunakan pasir kuarsa. Umumnya silika digunakan untuk proses coating atau pelapisan pada substrat-substrat material tertentu. (Fahrudin dkk, 2011). Keberadaan natrium silikat pada larutan aktivator, berfungsi untuk meningkatkan jumlah silika pada campuran geopolimer. Menurut Palomo dkk. 1999, reaksi geopolimerisasi akan semakin cepat dengan meningkatnya kandungan silika reaktif/ soluble pada campuran

Kombinasi natrium silikat dan natrium hidroksida telah banyak digunakan sebagai aktivator alkali, dengan rasio cairan aktivator terhadap bahan sumber di kisaran 0,25-0,30 (Rangan, et.al). Natrium Hidroksida tersedia dalam 2 bentuk, yaitu berupa flek (serpihan) atau cair. Senyawa ini merupakan senyawa yang paling murah dan mudah didapat di antara senyawa logam hidroksida lainnya. Natrium hidroksida (NaOH) adalah senyawa yang biasa digunakan sebagai aktivator dalam sintesis geopolimer. Senyawa tersebut dapat digunakan untuk



Gambar 13. (A) NaOH pellet, (B) Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

mengaktivasi abu terbang yang digunakan sebagai prekursor geopolimer. Larutan NaOH pekat memiliki sifat korosif sehingga penanganannya harus sesuai. Penambahan silikat menjadi salah satu cara penanganan sifat korosif NaOH (Provis et. all 2009).

SIFAT BETON GEOPOLIMER

Sifat unggul beton geopolimer, berdasarkan Prof. B. Vijaya Rangan dan Hardijito, antara lain adalah :

- Mengikat (*setting*) pada suhu kamar
- Tidak beracun, bebas/sangat kecil potensi *bleeding*
- Waktu pengerjaan yang panjang sebelum mengeras
- Kedap
- Resistensi tinggi terhadap panas dan tahan terhadap semua pelarut anorganik
- Kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton konvensional

Joseph Davidovits menemukan bahwa *flyash* bereaksi dengan larutan alkali dan membentuk bahan yang mengikat yang kemudian dinamakan geopolimer. Hardijito & Rangan mengamati bahwa tingkat konsentrasi natrium hidroksida

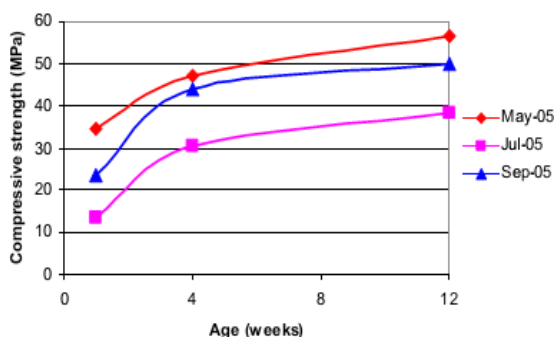
(molar) yang tinggi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dan semakin tinggi rasio cairan natrium silikat terhadap cairan natrium hidroksida dalam berat, menunjukkan kuat tekan yang lebih tinggi dari beton geopolimer. Mereka juga menemukan bahwa peningkatan temperatur perawatan (curing) dalam kisaran 30 sampai 90°C akan meningkatkan kuat tekan beton geopolimer dan waktu perawatan yang lebih lama juga meningkatkan akan kuat tekan. Karena panas dapat mempercepat reaksi, perawatan (curing) geopolimer setelah pencetakan/pengecoran yang dilakukan pada suhu tinggi pada umumnya akan menghasilkan kekuatan yang lebih baik dalam waktu yang lebih singkat. Namun, perawatan yang dilakukan pada suhu kamar juga telah berhasil dilakukan (Rangan, et.al) dan menghasilkan kekuatan yang memadai untuk keperluan structural seperti ditunjukkan dalam **Tabel 4**.

Tabel 4. *Proporsi campuran beton geopolimer yang dirawat pada temperatur ruang (Sumber : Rangan et.al)*

Material	Mass, kg/m ³
Coarse aggregates	20mm
	14mm
	7mm
Fine sand	554
Fly ash (low-calcium ASTM Class F)	408
Sodium silicate solution (SiO ₂ /Na ₂ O=2)	103
Sodium hydroxide solution (8 Molar)	41
Super Plasticiser	6

Silinder disimpan dalam kondisi ruang laboratorium dengan temperatur kamar bervariasi antara 20 dan 25°C. Benda uji mengeras dalam waktu 24 jam, dan dibuka dari cetakan tiga hari setelah pengecoran. **Gambar 14** menunjukkan hasil penelitian Wallah, et.al (2006) perawatan beton geopolimer dengan suhu ruang.

Silinder diuji tekan pada berbagai usia. Kuat tekan rata-rata dari masing masing empat benda uji adalah 35 MPa pada umur 7 hari dan 47 MPa pada umur 28 hari.



Gambar 14. Kuat tekan beton geopolimer yang dirawat di temperature ruang
(sumber : Wallah, et.al 2006)

Nguyen, (2009) mengungkapkan beton Geopolimer menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam kondisi asam dan garam lingkungan karena kapur tidak digunakan sebagai bahan dalam beton. Hal ini sesuai untuk kondisi lingkungan yang ekstrim, seperti di daerah laut atau rawa. Perubahan berat dari specimen yang direndam dalam larutan asam sulfat 10 % ditunjukkan dalam **Gambar 15** di bawah ini.

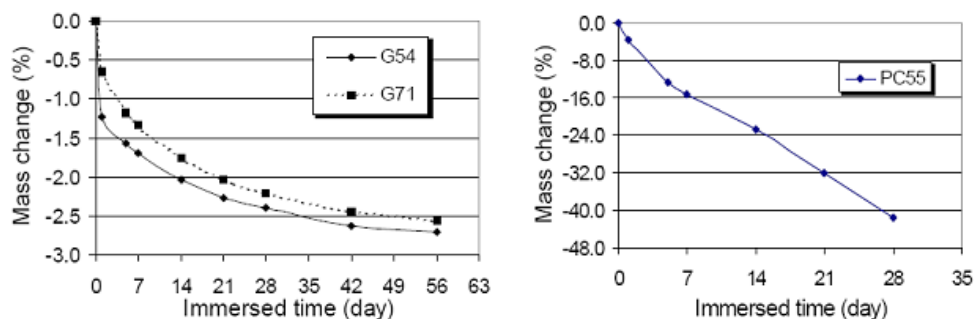
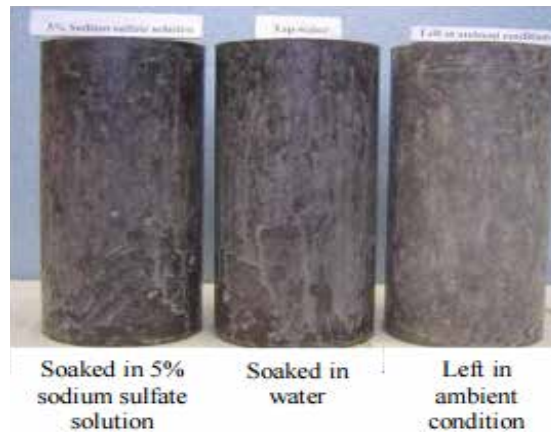


Figure 14 Mass change in 10% sulphuric acid
(X. J. Song, M. Marosszeki, M. Brungs, R. Munn, 2005)

Gambar 15. Kuat tekan beton geopolimer yang dirawat di temperature ruang
(sumber : Nguyen, 2009)

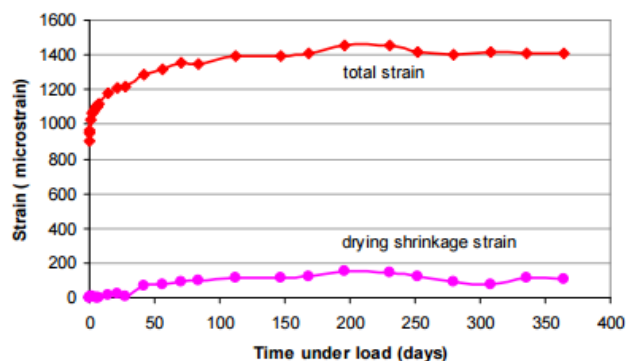
Wallah dan Rangan, melakukan studi perbandingan antara beton geopolimer yang direndam dalam air, di dalam larutan natrium sulfat dan dibiarkan di udara terbuka. Hasilnya menunjukkan hampir tidak terlihat perbedaan antara



Gambar 16. Kondisi visual benda uji setelah satu tahun
(sumber : Wallah, et.al, 2006)

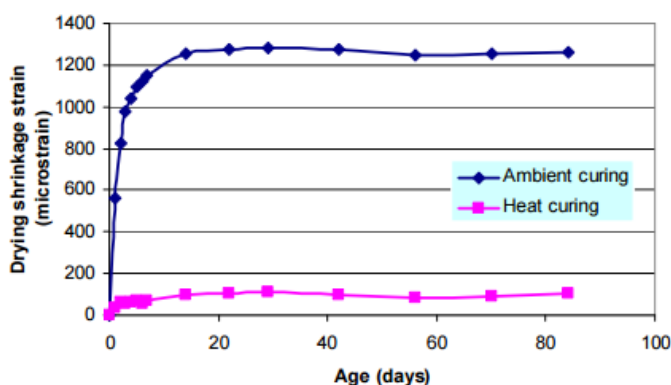
ketiga benda uji yang mendapat perlakuan berbeda tersebut, seperti pada **Gambar 16**.

Hasil pengujian (Wallah & Rangan, 2006) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 17** memperlihatkan bahwa beton geopolimer berbasis fly ash yang di rawat dengan cara pemanasan dalam oven menghasilkan susut kering yang sangat kecil sekitar 100 micro strains setelah satu tahun. Nilai ini sangat kecil dibandingkan dengan beton normal yang susut keringnya sebesar 500 to 800 micro strains.



Gambar 17. Susut kering beton geopolimer yang dirawat dalam oven
(sumber : Wallah, et.al, 2006)

Hal yang berbeda ditunjukkan dalam **Gambar 18**, dimana beton geopolimer yang di rawat pada temperature ruang memnghasilkan susut kering yang jauh lebih besar dibandingkan dengan yang dirawat pada temperature tinggi (oven). Selama proses kimia geopolimerisasi, air dilepaskan, sehingga hal inilah yang menyebabkan penyusutan yang tinggi, terutama pada usia di bawah 20 hari.



Gambar 18. Susut kering beton geopolimer yang dirawat pada di suhu ruang
(sumber : Wallah, et.al, 2006)

APLIKASI BETON TANPA SEMEN PORTLAND

Dalam praktek modern, (Aldred & Day, 2012), beton geopolimer telah diaplikasikan untuk struktur berikut seperti yang terlihat pada **Gambar 19**.

- Perkerasan kaku

Perkerassan dengan betuk yang umum diterapkan sepanjang 900 m dan lebar 5,5 m sebagaimana pada gambar 14, dicor di tempat dengan kelas kekuatan setara 25 MPa dan 40 MPa.

- Dinding beton penahan tanah

Beton geopolimer dengan kelas setara 40 MPa dalam betuk panel pracetak digunakan untuk tembok penahan tanah pada daerah permukiman. Panel dengan ukuran 6 m dan tinggi 2.4 mdirancang untuk menahan tanah dengan ketinggian 3 metres. Panel pracetak dibuat di pabrik dan dibawa ke lokasi pekerjaan setelah kekuatan rencana tercapai seperti pada **Gambar 20**.



Gambar 19. Aplikasi perkerasan kaku beton geopolimer cor ditempat
(sumber : Aldred, et.al, 2012)



Gambar 20. Aplikasi dinding penahan tanah beton geopolimer pracetak
(sumber : Aldred, et.al, 2012)



Gambar 21. Aplikasi penampung air pada beton geopolimer
(sumber : Aldred, et.al, 2012)



Gambar 22. Aplikasi jembatan dengan beton geopolimer
(sumber : Aldred, et.al, 2012)

- Tangki Air

Dua jenis beton dibandingkan pada aplikasi ini, dimana tangki pertama dibuat dengan beton normal 32 MPa dengan 80% Portland cement dan 20% flyash. Tangki kedua dibuat dengan beton geopolimer setara 32 MPa. Hal ini dilakukan untuk mengamati autogenous healing dari beton geopolimer. Autogenous healing pada beton normal disebabkan karena terjadinya deposisi calcium hydroxide. Calcium hydroxide yang ada pada beton geopolimer relative sangat sedikit, sehingga kinerja beton geopolimer pada aplikasi penampungan air cukup menarik untuk diamati ditunjukkan pada **Gambar 21**.

- Lantai jembatan pracetak

Salah satu aplikasi structural untuk beban berat dari beton geopolimer adalah pada lantai jembatan seperti ditunjukkan pada **Gambar 22**. Jembatan pada aplikasi ini adalah jembatan dengan gelagar yang terbuat dari pultruded fibreglass yang dirancang bekerja komposit dengan lantai jembatan dari beton geopolimer setara 40 MPa. Seluruh komponen jembatan dibuat dipabrik dan dipasang di lapangan. Beban yang melewati jembatan tersebut adalah truk mixer beton bermuatan, dan jembatan sama sekali tidak menunjukkan kerusakan akibat beban tersebut. ■



PENELITIAN DI PUSJATAN TERKAIT PENGUNAAN ABU TERBANG UNTUK BETON HVFAC DAN GEOPOLIMER

Terdapat 8 PLTU di Indonesia yang telah di survey oleh tim Puslitbang Jalan dan Jembatan pada tahun 2015. Data yang didapatkan dari PLTU tersebut diantaranya adalah : sumber batu bara, kapasitas produksi listrik, tipe boiler yang dipergunakan, konsumsi batubara, jumlah produksi *Fly Ash* dan *Bottom Ash*, serta klasifikasi dari *Fly Ash*, **Gambar 23** menunjukkan lokasi PLTU di Indonesia. Klasifikasi *Fly Ash* dari setiap PLTU dilakukan dengan analisa dari komposisi kimia oksida yang didapat melalui data XRF. Adapun data dari masing-masing PLTU dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Data beberapa PLTU di Indonesia

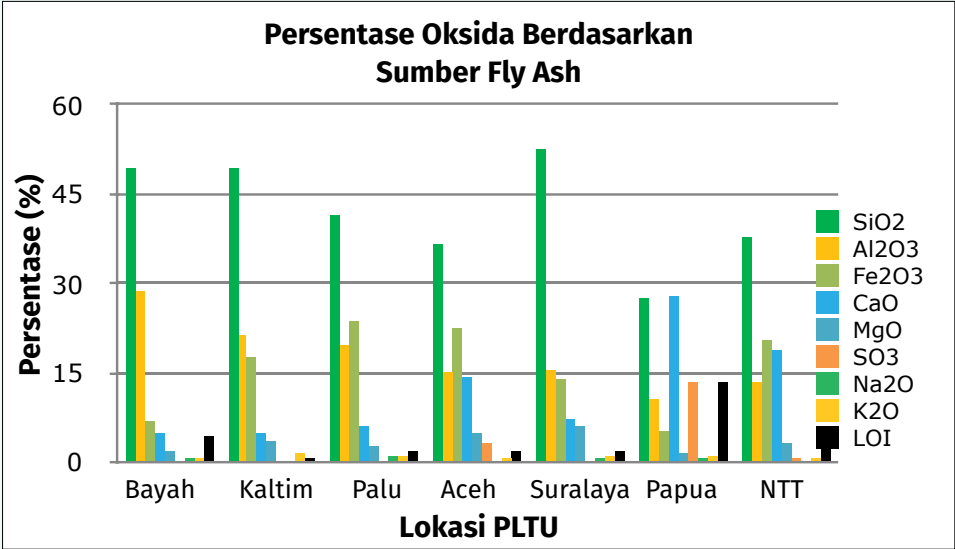
No.	Lokasi PLTU	Sumber Batubara	Kap. Prod. Listrik (MW)	Tipe Boiler	Konsumsi Batubara (per tahun)	Produksi FA/BA
1	Meulaboh (Aceh)	Kalimantan	2 x 110 MW	CFB (circulating fluidized bed)	3500 ton/ hari	-
2	Suralaya (Banten)	Kalimantan	1 X 625 MW	PC (pulverized coal)	3000 ton/hari	-
3	Tenggarong (Kaltim)	Kalimantan	2 x 25 MW dan 1 x 60 MW	PC (pulverized coal)	720 ton/ hari	60 ton/ hari
4	Palu (Sulteng)	Kalimantan	2 x 15 MW	PC (pulverized coal)	500 - 600 ton/ hari	17 – 32 ton/ hari
5	Timika (Papua)	Kalimantan	3 X 65 MW	PC (pulverized coal)	1900 ton/hari	
6	Ropa (NTT)	Kalimantan	2 x 16,5 MW	Stoker dan CFB (circulating fluidized bed)	480 ton/ hari	-
7	Tanjung Kasam Kepri	Kalimantan dan Palembang				1500 ton / tahun
8	Celukan Bawang (Bali)	Kalimantan	3 X 142 MW	Subcritical Boiler	2000 ton / hari	70-80 m ³ / hari 6 m ³ /hari

HASIL PENGUJIAN ABU TERBANG

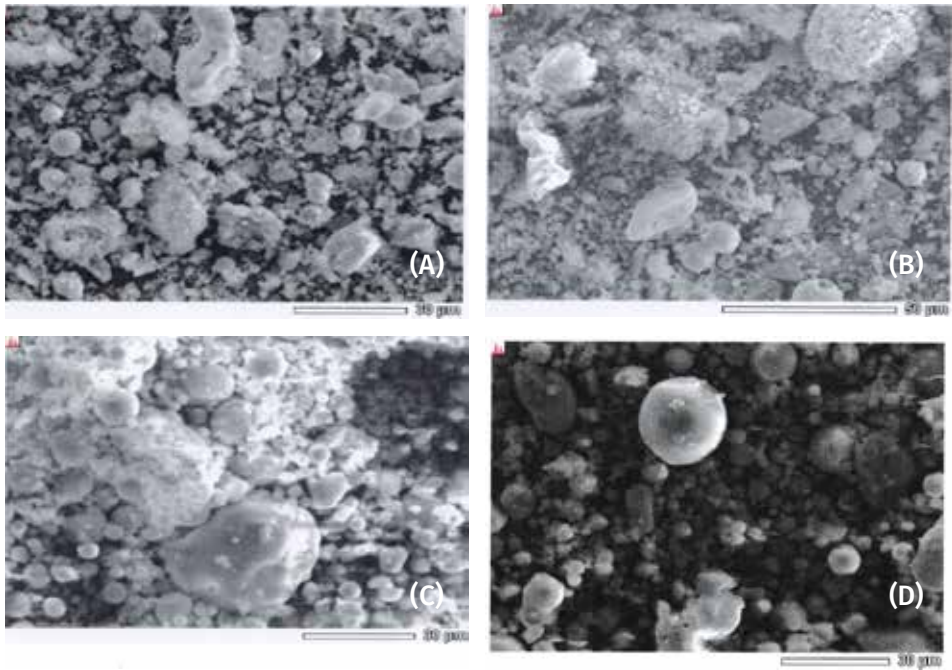
Terdapat 7 fly ash yang telah di lakukan pengujian XRF untuk mengetahui kandungan kimia oksida. Namun hanya 4 fly ash yang baru bisa dilakukan pengujian SEM- EDS. Adapun hasil dari data XRF fly ash sudah dapat diklasifikasi sesuai kelasnya berdasarkan ASTM C 618. Adapun data XRF dan SEM-EDS dari masing-masing fly ash dapat dilihat pada **Tabel 6, Gambar 24** dan **Gambar 25**.

Tabel 6. Tabel data XRF fly ash dari beberapa PLTU

Oksida	Sumber Abu terbang								
	Bayah	Kaltim	Palu	Aceh	Suralaya	Papua	NTT	Batam	Bali
SiO ₂	49.31	49.1	41.17	36.37	52.3	27.24	37.6	-	-
Al ₂ O ₃	28.5	21.08	19.42	15.21	15.34	10.46	13.46	-	-
Fe ₂ O ₃	6.91	17.41	23.84	22.27	13.98	5.22	20.19	-	-
CaO	4.84	4.74	5.82	14.14	7.11	27.74	18.59	-	-
MgO	1.68	3.55	2.63	4.7	5.93	1.53	3.16	-	-
SO ₃	<0.01	0.03	0.33	2.87	0.23	13.29	0.76	-	-
Na ₂ O	0.73	0.03	0.97	0.22	0.44	0.54	0.28	-	-
K ₂ O	0.53	1.4	1.15	0.54	0.83	0.89	0.67	-	-
LOI	4.42	0.8	1.74	1.96	1.78	13.28	2.3	-	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	84.72	87.59	84.43	73.85	81.62	42.92	71.25	-	-
Kelas	F	F	F	C	F	-	C	-	-



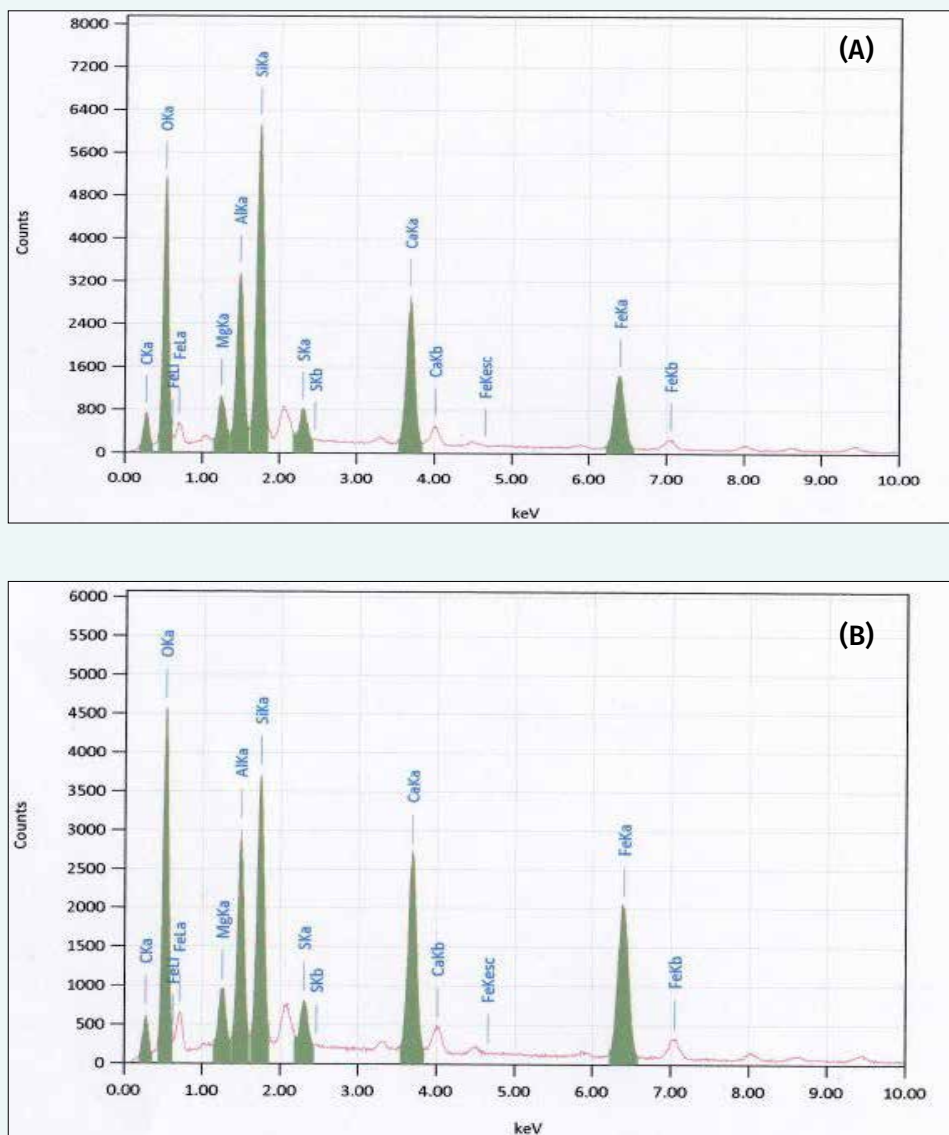
Gambar 24. Grafik kandungan kimia Oksida dari beberapa PLTU berdasarkan data XRF



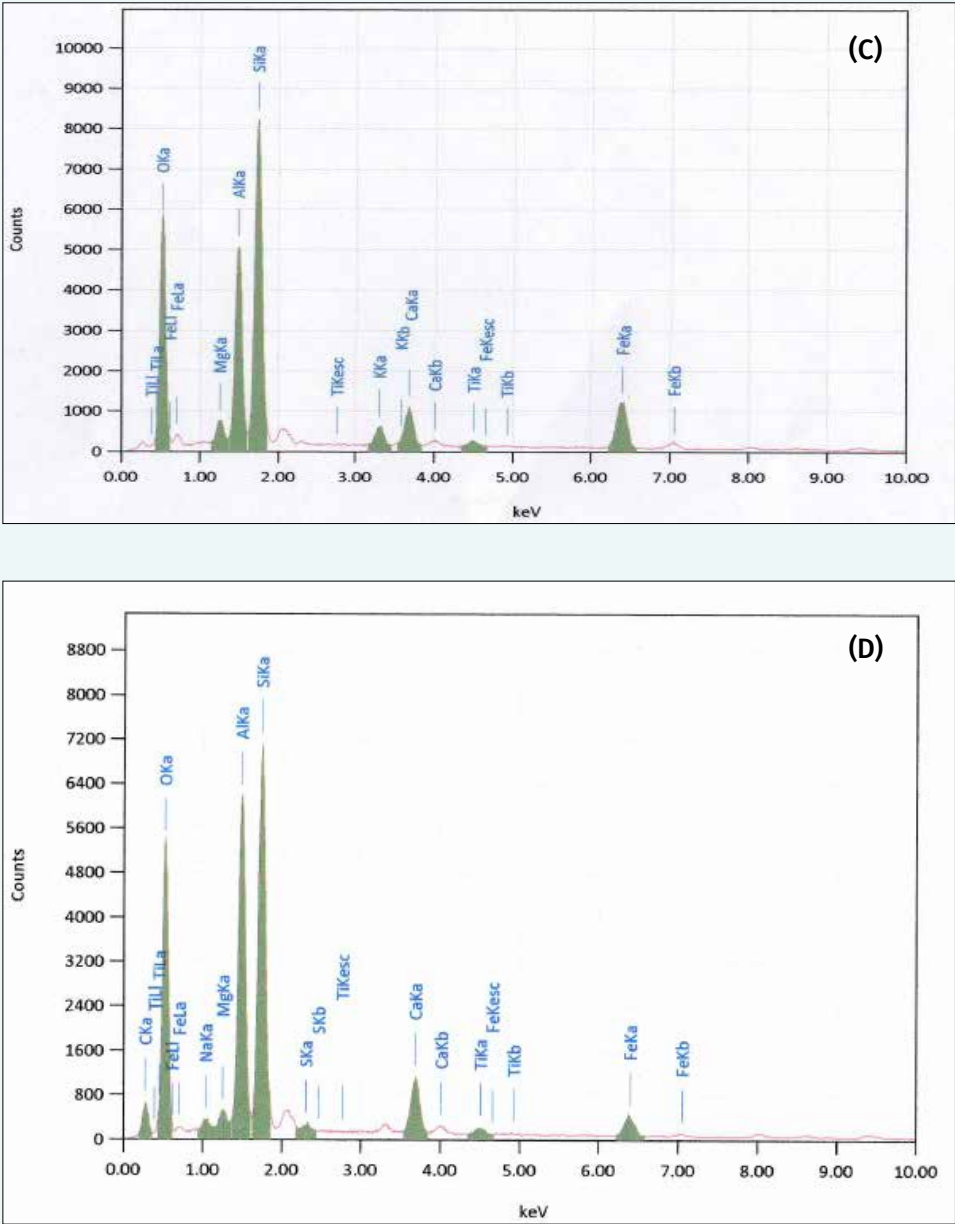
Gambar 25. (A) SEM (Scanning Electron Microscope) Suralaya, (B) SEM (Scanning Electron Microscope) Aceh, (C) SEM (Scanning Electron Microscope) Kalimantan Timur, (D) SEM (Scanning Electron Microscope) Bayah

Selain pengujian SEM EDS juga dilakukan uji X-Ray SEM dari 4 lokasi sampel Fly Ash antara lain : Suralaya, Aceh, Kaltim dan Bayah. Hasil pengujian SEM X-Ray dapat dilihat pada **Gambar 26**.

Dari hasil pengujian SEM diatas terlihat bahwa kandungan silika tertinggi dari ke tiga jenis Fly Ash yang berasal dari Suralaya, untuk jenis Fly Ash ini sangat baik untuk beton geoplimer seperti terlihat pada **Gambar 26 (C)**.



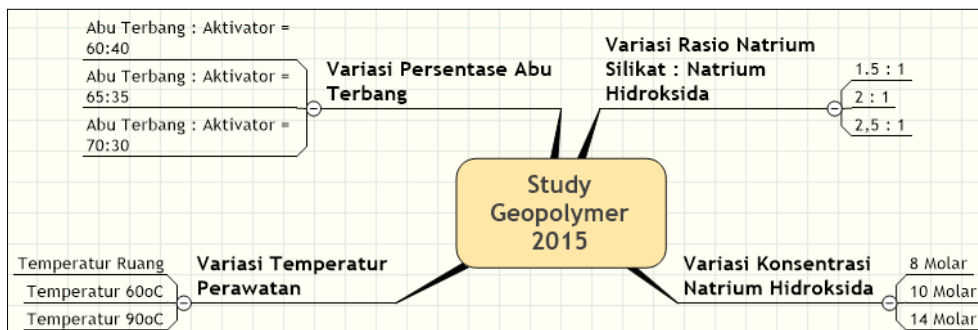
Gambar 26. (A) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Suralaya,
(B) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Aceh



Gambar 26. - lanjutan (C) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Kalimantan Timur, (D) X- Ray SEM (Scanning Electron Microscope) Bayah

HASIL PENELITIAN BETON TANPA SEMEN PORTLAND

Kegiatan yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari berbagai variasi campuran yang di uraikan dalam **Gambar 27**.



Gambar 27. Variasi Percobaan Laboratorium untuk Beton Tanpa Semen Portland

KOMPOSISI CAMPURAN YANG DIGUNAKAN

Pada **Tabel 7** sampai dengan **Tabel 10** tersaji komposisi campuran yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini.

Tabel 7. Variasi Konsentrasi NaOH

No	Kode Campuran	Komponen Geopolimer				
		Abu terbang	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Pasir	Air Tambahan
1	Campuran 1 (8M)	65%	60%	40% (8M)	52%	-
2	Campuran 2 (10M)	65%	60%	40% (10M)	52%	-
3	Campuran 3 (14M)	65%	60%	40% (14M)	52%	-

Tabel 8. Variasi Temperatur Curing

No	Kode Campuran	Komponen Geopolimer				
		Abu terbang	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Pasir	Air Tambahan
1	Campuran 1 (30°C)	65%	60%	40% (14M)	52%	-
2	Campuran 2 (60°C)	65%	60%	40% (14M)	52%	-
3	Campuran 3 (90°C)	65%	60%	40% (14M)	52%	-

Tabel 9. Variasi Rasio Abu Terbang terhadap Aktivator

No	Kode Campuran	Komponen Geopolimer				
		Abu terbang	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Pasir	Air Tambahan
1	Campuran 1 (60)	60%	65%	35%	52%	-
2	Campuran 2 (65)	65%	65%	35%	52%	-
3	Campuran 3 (70)	70%	65%	35%	52%	-

Tabel 10. Variasi Rasio Aktivator

No	Kode Campuran	Komponen Geopolimer				
		Abu terbang	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Pasir	Air Tambahan
1	Campuran 1 (1:1,5)	65%	60,00%	40,00% (14M)	52%	-
2	Campuran 2 (1:2,0)	65%	66,67%	33,33% (14M)	52%	-
3	Campuran 3 (1:2,5)	65%	71,43%	28,57% (14M)	52%	-

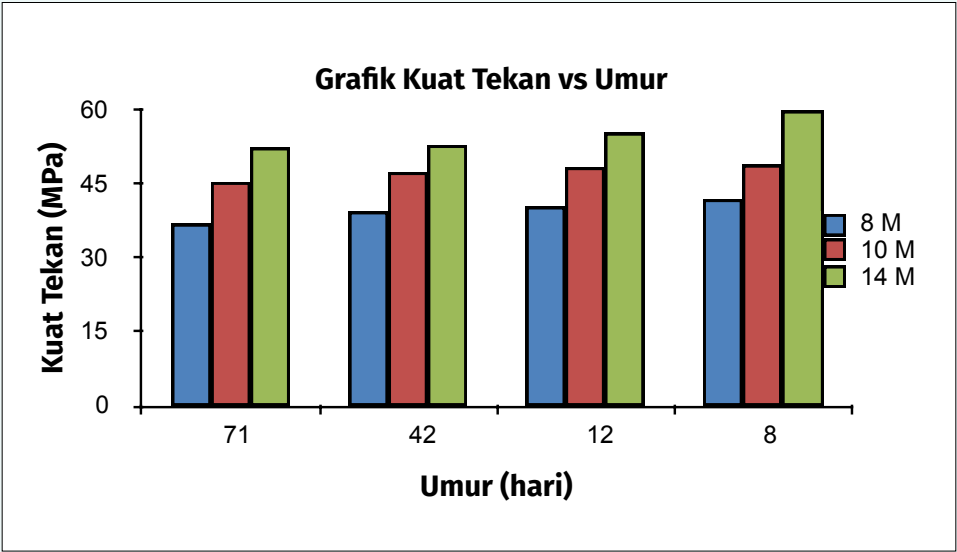
Adapun karakteristik bahan yang digunakan dalam percobaan-percobaan yang dilakukan dapat disampaikan dalam **Tabel 11**.

Tabel 11. Karakteristik Bahan yang Digunakan

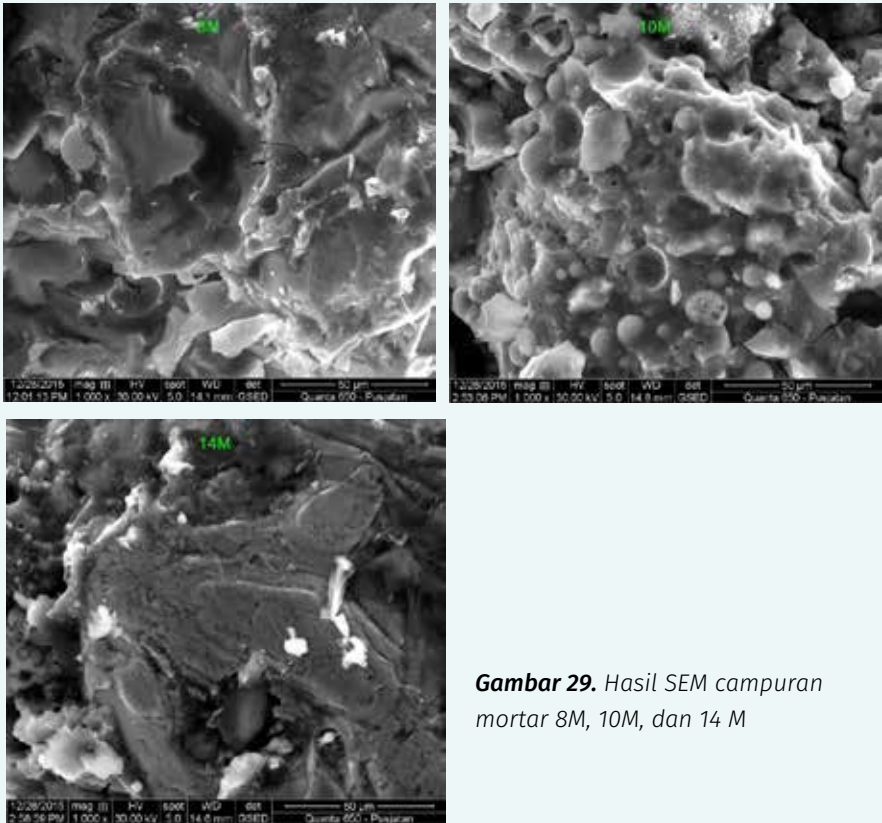
No	Bahan	Sumber	Karakteristik
1	Air	Air Keran	Liquid, Clear, SG : 1,000
2	Abu Terbang	Suralaya	Powder, Brown, SG : ?
3	Na ₂ SiO ₃	Bratachem	Liquid, SG : ?
4	NaOH	Bratachem	Pellet, White, 98% pure
5	Agregat Halus	Buntu	Natural Sand, SG : 2.77 (JKP), FM : 2,1
6	Water Reducer	KAO	Liquid, Lignosulphonante Based

HASIL PENGUJIAN MORTAR GEOPOLIMER

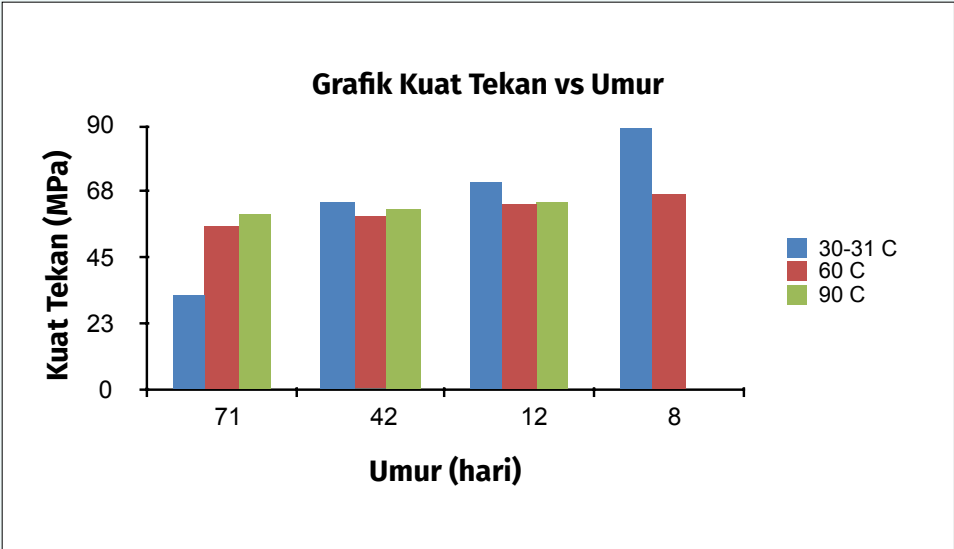
Dari hasil pengujian kuat tekan mortar dari variasi konsentrasi NaOH terlihat bahwa semakin tinggi molaritas dari aktiftornya kuat tekan mortar yang dihasilkan semakin naik. Seperti terlihat pada **Gambar 28**.



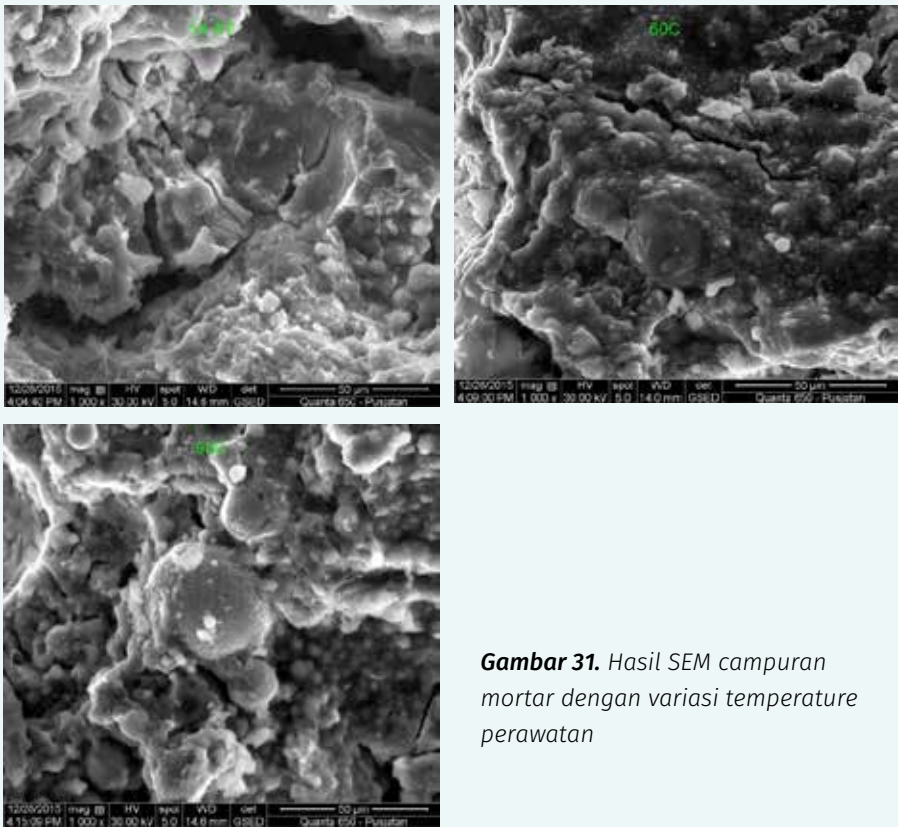
Gambar 28. Hasil Uji Tekan Mortar pada Berbagai Umur dan Variasi Konsentrasi NaOH



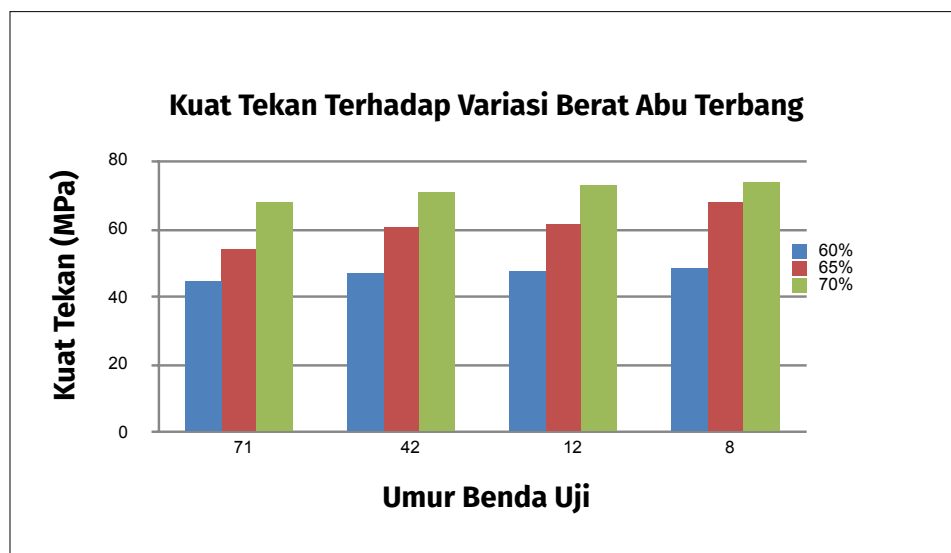
Gambar 29. Hasil SEM campuran mortar 8M, 10M, dan 14 M



Gambar 30. Hasil Uji Tekan Mortar pada Berbagai Umur dan Variasi Temperatur Perawatan



Gambar 31. Hasil SEM campuran mortar dengan variasi temperature perawatan



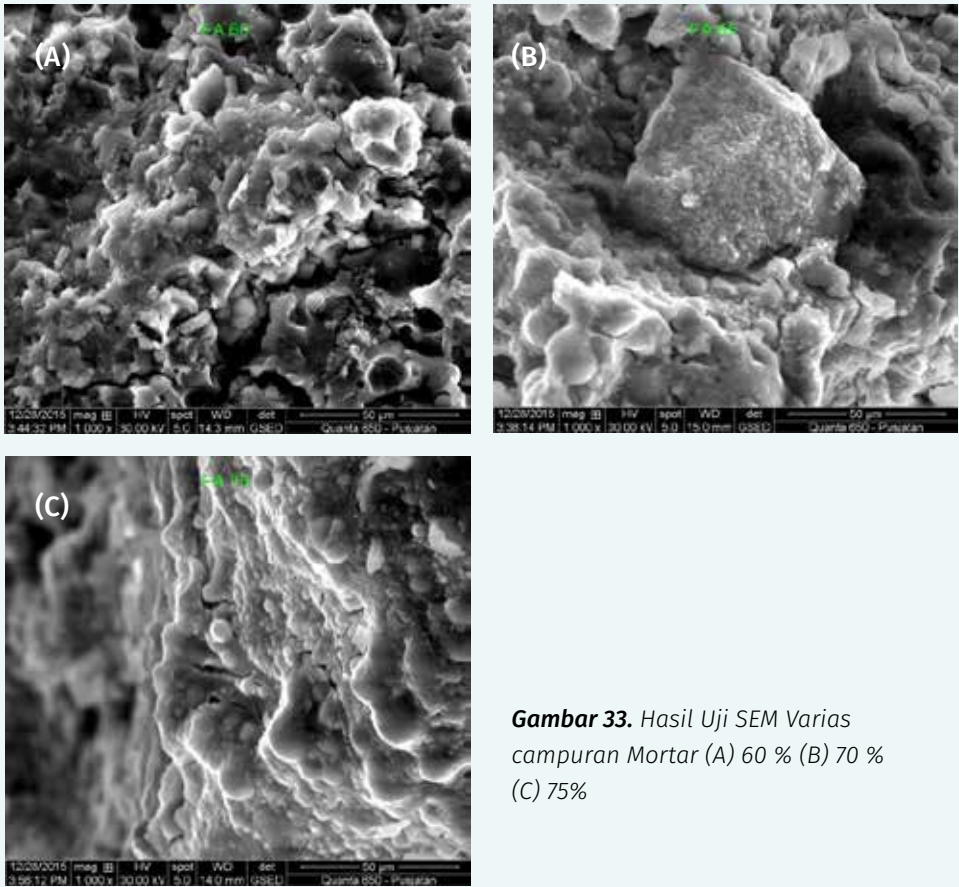
Gambar 32. Hasil Uji Tekan Mortar pada Berbagai Umur dan Variasi Rasio Abu terbang

Dari hasil pengujian kuat tekan Mortar dengan variasi umur dan temperatur perawatan terlihat bahwa semakin tinggi umur dan temperatur perawatan beton maka kekuatan beton semakin naik, seperti ditunjukkan pada **Gambar 30**.

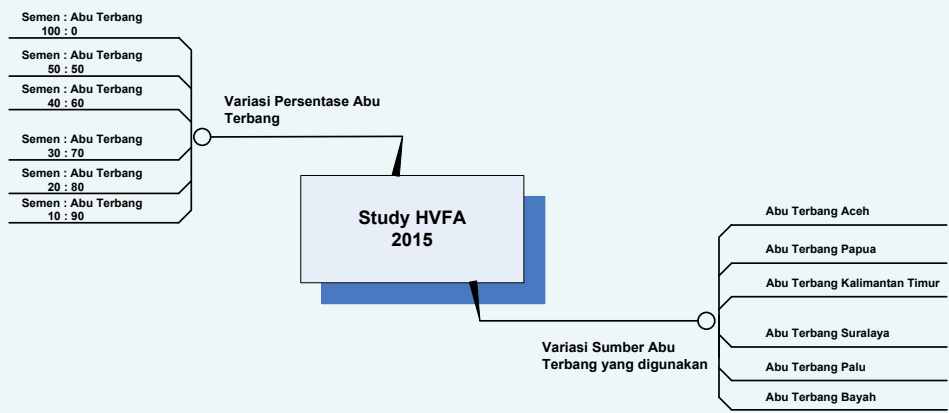
Selain uji tekan dilakukan pengujian SEM untuk mengetahui mikro struktur dari beton Geopolimer, hasil uji SEM tersebut dapat ditunjukkan pada **Gambar 31**.

Dari hasil pengujian kuat tekan Mortar dengan variasi umur dan perbandingan pemakaian *Fly Ash* terlihat bahwa semakin tinggi umur dan presentase campuran *Fly Ash* pada mortar maka kekuatan beton semakin naik, seperti ditunjukkan pada **Gambar 32**.

Hasil pengujian mikrostruktur mortar geopolimer dengan variasi komposisi *Fly Ash* ditunjukkan pada **Gambar 33**.



Gambar 33. Hasil Uji SEM Varias campuran Mortar (A) 60 % (B) 70 % (C) 75%



Gambar 34. Variasi Percobaan Laboratorium untuk Beton Sedikit Semen Portland

HASIL PENELITIAN BETON SEDIKIT SEMEN PORTLAND

Dalam penelitian penggunaan beton dengan sedikit semen direncanakan menggunakan 2 variasi utama, yaitu variasi persentase penggunaan fly ash dan variasi sumber abu terbang yang digunakan. Variasi substitusi fly ash digunakan sebesar 0%, 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% yang berasal dari Suralaya. Untuk variasi sumber fly ash digunakan substitusi fly ash sebesar 50% dari semen OPC. Lokasi sumber fly ash yang digunakan berasal dari Aceh, Papua, Kalimantan Timur, Suralaya, Paludan Bayah. Adapun variasi kegiatan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 34**.

KOMPOSISI CAMPURAN YANG DIGUNAKAN

Dalam penelitian ini digunakan komposisi campuran dengan perbandingan semen dan pasir sebesar 1 : 2,75. Adapun komposisi campuran untuk 2 variasi penggunaan fly ash dapat dilihat pada **Tabel 12** sampai dengan **Tabel 13**.

Tabel 12. Variasi Rasio Abu Terbang yang digunakan

No	Kode Campuran	Komponen HVFAC				
		Semen	Pasir	Air	Fly Ash	SP
1	0%	1.00	2.75	0.33	0.00	0.01
2	50%	0.50	2.75	0.33	0.50	0.01
3	60%	0.40	2.75	0.33	0.60	0.01
4	70%	0.30	2.75	0.33	0.70	0.01
5	80%	0.20	2.75	0.33	0.80	0.01
6	90%	0.10	2.75	0.33	0.90	0.01

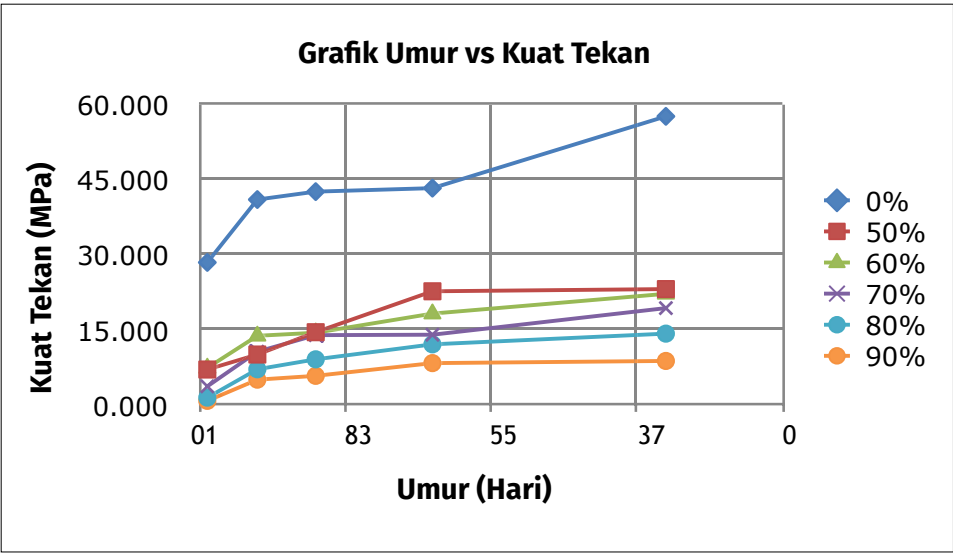
Tabel 13. Variasi Sumber Abu Terbang yang digunakan

No	Kode Campuran	Komponen HVFAC				
		Semen	Pasir	Air	Fly Ash	SP
1	Aceh	1.00	5.50	0.60	1.00	0.02
2	Papua	1.00	5.50	0.60	1.00	0.02
3	Kaltim	1.00	5.50	0.60	1.00	0.02
4	Suralaya	1.00	5.50	0.60	1.00	0.02
5	Palu	1.00	5.50	0.60	1.00	0.02
6	Bayah	1.00	5.50	0.60	1.00	0.02

Dalam penelitian ini digunakan semen OPC dari Indocement, pasir dari Muntilan dan air dari saluran air bersih Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan. Adapun karakteristik bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 14**.

Tabel 14. Karakteristik Bahan yang Digunakan

No	Bahan	Sumber	Karakteristik
1	Air	Air Keran	Liquid, Clear, SG : 1,000
2	Abu Terbang	Aceh	Powder, Brown, SG : 2,84
		Papua	Powder, Grey
		Kaltim	Powder, Grey
		Suralaya	Powder, Brown
		Palu	Powder
		Bayah	Powder, Grey
5	Agregat Halus	Buntu	Natural Sand, SG : 2.77 (JKP), FM : 2,1
6	Water Reducer	KAO	Liquid, Lignosulphonante Based



Gambar 35. Peningkatan Kuat tekan terhadap umur dengan variasi rasio abu terbang

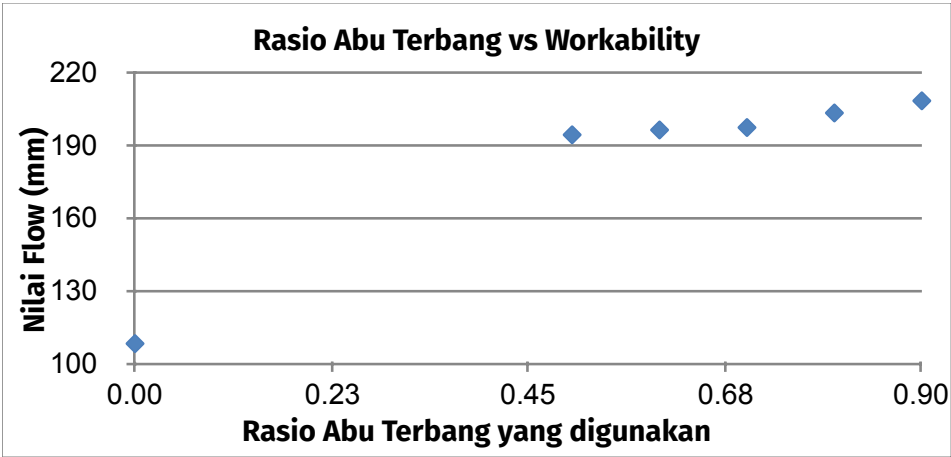
HASIL PENGUJIAN

Pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini menggunakan 2 buah benda uji kubus dengan ukuran 5 x 5 x 5 cm pada masing – masing variasi. Pengujian kuat tekan mortar dilakukan pada umur 1 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari dan 56 hari.

Pada **Gambar 35** dapat dilihat bahwa kuat tekan mortar semakin menurun seiring dengan bertambahnya komposisi fly ash yang digunakan sebagai bahan substitusi semen pada semua umur pengujian. Sebagai contoh pada umur 28 hari diperoleh kuat tekan mortar tanpa fly ash sebesar 43,305 Mpa, sedangkan untuk substitusi fly ash sebesar 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% dari berat semen diperoleh kuat tekan mortar berturut – turut adalah 22,690 Mpa, 18,230 Mpa, 14,010 Mpa, 12,088 Mpa dan 8,335 MPa.

Pengaruh penambahan substitusi fly ash pada semua variasi dalam penelitian ini belum menunjukkan peningkatan kuat tekan mortar terhadap mortar tanpa fly ash pada semua umur pengujian. Hasil ini dapat disebabkan karena adanya pengaruh dari silika yang bersifat tidak amorf dan komposisi kimia pada fly ash itu sendiri.

Penggunaan fly ash mempunyai pengaruh terhadap sifat workability campuran mortar. Pengaruh variasi penggunaan kadar fly ash dapat dilihat pada **Gambar 36**. Dari **Gambar 36** didapatkan bahwa penggunaan rasio fly ash yang semakin tinggi menyebabkan semakin tinggi pula flow yang dihasilkan.

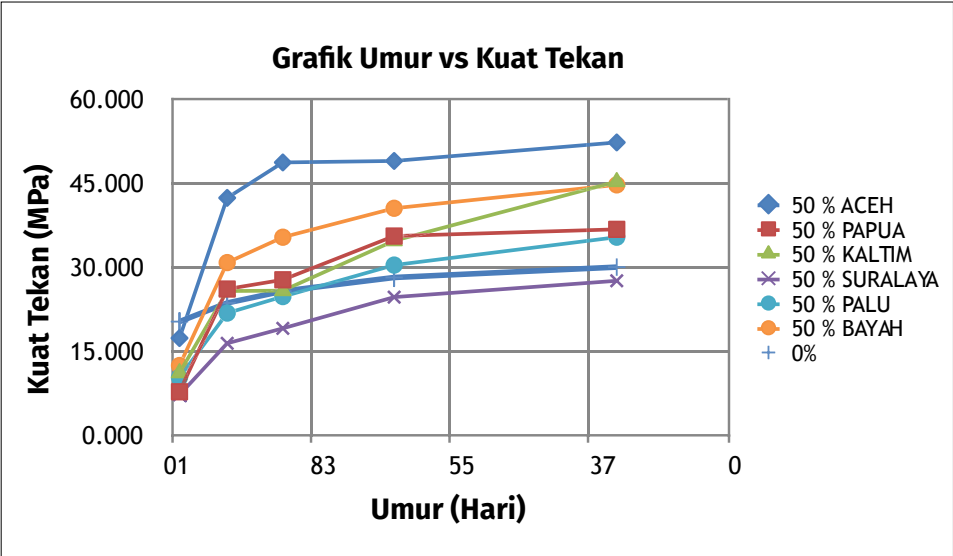


Gambar 36. Perubahan nilai workability seiring peningkatan rasio Abu terbang

Pengujian slump flow menunjukkan bahwa pemakaian fly ash dengan kadar tertentu dapat mempengaruhi sifat workability dari campuran mortar yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan ukuran butir fly ash yang cenderung berbentuk bulat, maka gesekan antar butir yang dihasilkan sangat kecil, sehingga akan menghasilkan sifat flowability yang semakin baik pula.

Pengujian kuat tekan beton dengan variasi sumber fly ash dilakukan dengan penambahan komposisi fly ash sebesar 50%. Pengujian kuat tekan pada penelitian ini menggunakan 2 buah benda uji kubus dengan ukuran 5 x 5 x 5 cm pada masing – masing variasi sumber fly ash. Pengujian kuat tekan mortar dilakukan pada umur 1 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari dan 56 hari. Hasil pengujian kuat tekan mortar selengkapnya dapat dilihat pada **Gambar 37**.

Dari hasil pengujian kuat tekan mortar (**Gambar 37**) menunjukkan bahwa nilai kuat tekan mortar fly ash yang berasal dari Suralaya mempunyai nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan kuat tekan mortar yang berasal dari Aceh, Palu, Papua, bayah, Kaltim dan tanpa fly ash. Hasil ini sesuai dengan penelitian pada penggunaan variasi komposisi fly ash sebesar 0%, 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% yang tertera pada **Gambar 35**. Hasil ini dapat disebabkan karena kandungan atau sifat kimia fly ash yang tidak bereaksi/ bersifat amorf.



Gambar 37. Peningkatan Kuat tekan terhadap umur dengan variasi sumber abu terbang

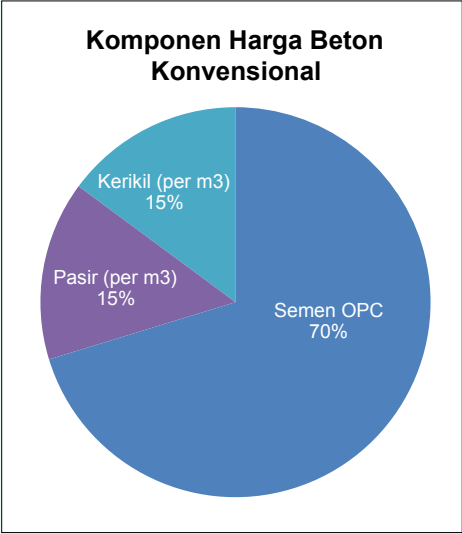
Untuk penggunaan fly ash dari aceh menunjukkan nilai kuat tekan yang paling tinggi dibandingkan dengan yang lain. Laju kenaikan kuat tekan dengan menggunakan fly ash yang berasal dari Aceh pada umur 7 hari, 14 hari, 28 hari dan 56 hari mengalami kenaikan dibandingkan dengan mortar dengan 0% fly ash. Hasil ini sesuai dengan penggunaan fly ash dari Papua, Palu, Bayah dan Kaltim yang menunjukan hasil nilai kuat tekan mortar yang lebih besar dibandingkan dengan mortar tanpa fly ash. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh fly ash terhadap kuat tekan mortar. Reaksi antara kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) dengan senyawa silika (SiO_2) yang terkandung dalam fly ash membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) yang mempunyai sifat menambah kekuatan.

ANALISIS DAN KOMPARASI BIAYA

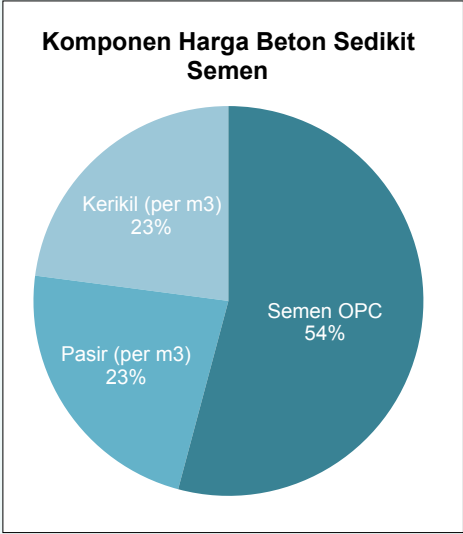
Untuk mengetahui biaya yang diperlukan untuk pembuatan campuran per m^3 beton, terlebih dahulu harus diketahui komposisi dari harga per kg masing – masing material pembentuk beton. Proporsi campuran dan harga per kg material beton dapat dilihat pada **Tabel 15**. Komponen penyusun dan harga beton konvensional, sedikit semen dan tanpa semen dapat dilihat berturut – turut pada **Gambar 38**, **Gambar 39** dan **Gambar 40**.

Tabel 15. Harga Satuan bahan yang digunakan

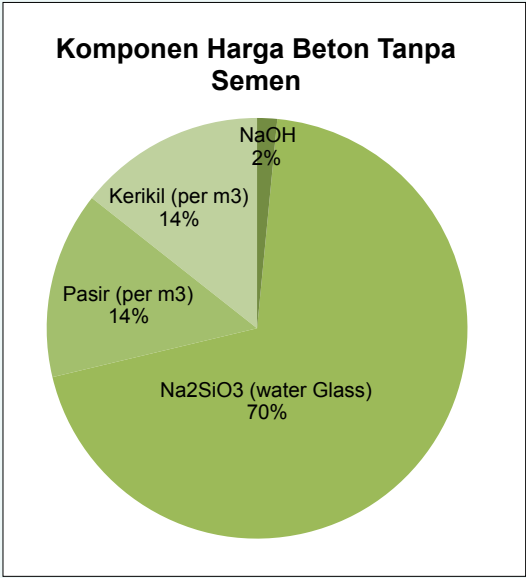
Bahan	Harga/kg (Rp)	Harga /unit (Rp)
OPC	1,400.00	70.000,00/sak 50 kg
Fly Ash	1.00	1.00
Air	1.00	1.00
NaOH	200.00	200.000/ton
Na_2SiO_3 (water Glass)	2,500.00	2.500.000/ton
Pasir	140.00	196.000/ m^3
Kerikil	175.00	245.000/ m^3
Superplasticizer	10.000	2.000.000/drum 200 kg



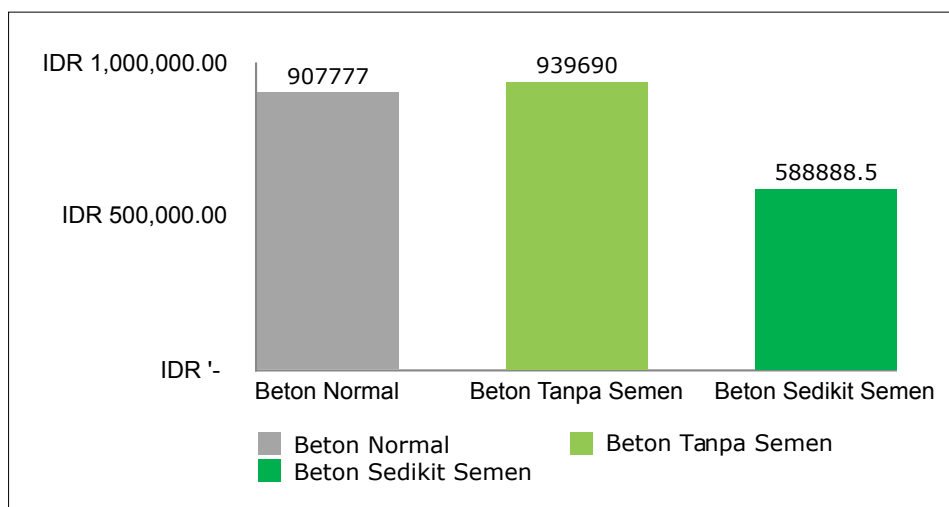
Gambar 38. *Komponen Harga beton secara tipikal*



Gambar 39. *Komponen Harga beton SSP secara tipikal*



Gambar 40. *Komponen Harga beton TSP secara tipikal*



Gambar 41. Perbandingan harga bahan per m³ dengan kelas kekuatan sama

Dari **Gambar 41** dapat diketahui bahwa pembuatan beton dengan sedikit semen mempunyai efisiensi biaya paling besar, sedangkan untuk beton normal dan beton tanpa semen (geopolimer), biaya yang diperlukan untuk pembuatan beton per m³ mempunyai nilai yang relatif hampir sama.

KENDALA DALAM PENGEMBANGAN LEBIH JAUH

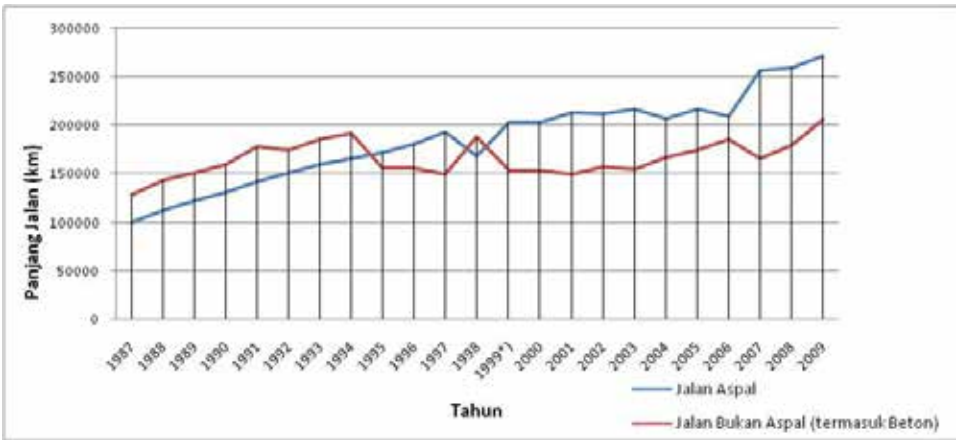
Telah banyak aplikasi beton geopolimer untuk berbagai keperluan baik struktural dan sebagainya, akan tetapi masih banyak kendala yang sudah jelas terpantau. Salah satunya adalah risiko yang terkait dengan alkalinitas tinggi dari aktivator, alkalinitas tinggi biasanya membutuhkan proses lanjutan, yang membutuhkan konsumsi energy tambahan dan menghasilkan tambahan gas rumah kaca. Proses geopolimerisasi juga pada umumnya membutuhkan temperature yang relative lebih tinggi dalam kondisi yang terkendali (Hardjito et al. 2004; Tempest et al. 2009; Lloyd and Rangan 2009). Hal semacam ini yang biasanya menjadi pembatasan dalam aplikasi di bidang infrastruktur transportasi.

Riset lanjutan dibutuhkan untuk mengatasi hambatan-hambatan teknis semacam ini. Riset yang banyak dilakukan saat ini berfokus pada pengembangan geopolimer yang lebih *user friendly* yang tidak membutuhkan activator

Tabel 16. Pangsa pasar beton di Indonesia

Jenis Pekerjaan	2004	2005	2006	2007	2008	2009*
Konstruksi Bangunan Gedung	23,377,654	28,197,067	31,374,730	34,612,257	33,078,407	40,050,649
Konstruksi Bangunan Sipil	21,499,912	24,378,724	26,049,107	28,615,500	46,241,921	46,596,400
Konstruksi Khusus	11,126,972	14,742,128	14,519,472	18,447,216	22,695,272	24,184,988
TOTAL	56,004,538	67,317,918	71,943,309	81,674,973	102,015,600	110,832,037

* Angka Sementara
Sumber : BPS 2010



Gambar 42. Statistik panjang jalan di Indonesia (sumber : BPS 2009)

dengan tingkat alkalinitas terlalu tinggi, menghasilkan semen yang memiliki kinerja setara dengan Portland semen dan dapat dirawat pada temperature ambient. ■

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Dari serangkaian hasil penelitian yang dikumpulkan dan pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil percobaan dalam campuran beton berbagai tipe dan sumber abu terbang, kekuatan yang dapat dicapai dengan pengurangan jumlah semen mulai dari 50 % sampai dengan 100 % dapat mencapai kekuatan yang setara dengan beton yang menggunakan 100 % semen portland.
2. Kelas kekuatan yang dapat dicapai akan berbeda tergantung pada sumber abu terbang (komposisi senyawa dalam abu terbang), serta perancangan campuran (komposisi bahan penyusun beton) yang dibuat.
3. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di dalam negeri maupun di luar negeri, abu terbang dinyatakan layak digunakan sebagai bahan konstruksi yang aman, kompetitif dari segi kekuatan, pelaksanaan dan keawetan serta ekonomisi,

dengan tetap memperhatikan aspek teknis, kesehatan dan lingkungan pada saat pengelolaannya.

4. Dari hasil percobaan mortar tanpa semen (geopolimer) menunjukan kuat tekan yang baik. Hal ini didukung dari data-data kuat tekan yang telah didapat. Namun perlu dilakukan beberapa penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan workability yang lebih baik sehingga dapat dikerjakan dengan mudah dilapangan.
5. Dari hasil analisis efesiensi biaya dapat diketahui bahwa pembuatan beton dengan sedikit semen mempunyai tingkat efesiensi yang paling tinggi, sedangkan untuk beton tanpa semen biaya yang diperlukan untuk pembuatan beton per m³ mempunyai nilai yang relatif hampir sama.

SARAN

1. Dari hasil penelitian ini masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap durabilitasnya
2. Untuk mengetahui kereaktifan (amorphous) material fly ash maka disarankan dilakukan X-ray Difrraction (XRD).
3. Perlu dilakukan pengujian terhadap kandungan silika soluble (silika reaktif) yang terkandung didalam fly ash.
4. Pada penelitian yang dilakukan benda uji masih dalam bentuk mortar, sehingga perlu dikaji lebih lanjut perilaku fisika dan mekanika benda uji dalam skala beton dan beton bertulang dalam bentuk model fisik di laboratorium.
5. Untuk komponen beton geopolimer yang bersifat non structural, perlu dilakukan percobaan (mock-up) pembuatan prototipenya sebelum dapat diaplikasikan dan dibuat pedomannya.
6. Perlu dilakukan kajian terhadap pengujian tidak merusak (*Non Destructive Test*) dari beton geopolimer yang dibandingkan dengan hasil uji mekanik
7. Perlu dilakukan analisa kimia yang terjadi terhadap masing-masing campuran
8. Perlu dilakukan pengujian fatigue pada beton geopolimer. ■

DAFTAR PUSTAKA

- Aldred, J., & Day, J. (2012). Is Geopolymer Concrete a Suitable Alternative To Traditional Concrete ? *37th Conference on Our World in Concrete & Structures*, (August), 1–14.
- Aleem, M. I. A., & Arumairaj, P. D. (2012). Geopolymer Concrete - a Review. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1(2), 118–122. <http://doi.org/10.7323/ijeset/v1>
- Analyst, B. A. (2004). Can HVFAC technology be adopted for site-mixed concrete ? *October*, (November), 1–3.
- Andrews-phaedonos, F. (2014). Specification and Use of Geopolymer Concrete. *9th Austroads Bridge Conference*, 1–12.
- announce20150421041640.pdf. (n.d.).
- Antoni, Wattimena, O. K., & Hardjito, D. (2012). Improving surface durability of high volume fly ash concrete with application of alkali solution. *Advanced Materials Research*, 626, 636–640. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.636>
- Arezoumandi, M., & Volz, J. S. (2013). Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high-volume fly ash concrete beams. *Journal of Cleaner Production*, 59, 120–130. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.043>
- Arifi, E., Zacoeb, A., & Shigeishi, M. (2014). EFFECT OF FLY ASH ON THE STRENGTH OF CONCRETE MADE FROM RECYCLED AGGREGATE BY PULSED POWER. *International Journal of GEOMATE*, 7(1), 1009–1016.
- Ash, F. (1998). Concrete Admixture Use with High Volume Fly Ash Technical Bulletin TB-0113.
- Ash, F. L. Y. (2009). REFERENCE Fly Ash In AustrAliAn stAndArds opportunties with usIng Fly Ash In concrete. *Concrete*, (1), 1–3.
- Ash, H. F. L. Y. (n.d.). Supplementary Cementing.
- Atiş, C. D. (2005). Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1112–1121. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.037>

- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2000). Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1367–1374. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00349-5](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00349-5)
- Balakrishnan, B., & Awal, A. S. M. A. (2014). DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING HIGH VOLUME MALAYSIAN FLY ASH. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(04), 529–533.
- Bargaheiser, K., & Butalia, T. S. (n.d.). Prevention of Corrosion in Concrete Using Fly Ash Concrete Mixes, 1–16. Retrieved from <http://circainfo.ca/pdf/K.Bargaheiser-CorrosionPaper.pdf>
- Basu, P. C., & Saraswati, S. (2006). Are existing IS codes suitable for engineering of HVFAC? *Indian Concrete Journal*, 80(8), 17–21. Retrieved from https://icjonline.com/views/POV_Basu_Aug_2006.pdf
- Bazzar, K., Bouatiaoui, M. R., & Alaoui, A. H. (2013). Performance Approach the Durability of High Volume Fly Ash Concrete. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2(2), 1–11.
- Bentz, D. P. (1812). Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concretes : Assuring Properties and Performance NIST Technical Note 1812 Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concretes : Assuring Properties and Performance.
- Bentz, D. P., Jones, S. Z., & Snyder, K. a. (2015). Design and performance of ternary blend high-volume fly ash concretes of moderate slump. *Construction and Building Materials*, 84, 409–415. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.082>
- Bi, J., Pane, I., Hariandja, B., & Imran, I. (2012). The Use of Nanosilica for Improving of Concrete Compressive Strength and Durability. *Applied Mechanics and Materials*, 204-208, 4059–4062. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4059>
- Caldas-vieira, F., Feuerborn, H., & Saraber, A. (2013). European Product Standards – Update on status and changes with relevance to CCPs, (July), 1–15. Retrieved from <http://www.worldofcoalash.org/2013/ashpdf/a135-Feuerborn-2013.pdf>
- Camões, a. (2006). Durability of high-volume fly ash concrete. *International RILEM Workshop*, (1), 311–318.

-
- Candidate, E. I. D. P. D. (2010). Geopolymer Concrete, 1–34.
- Castel, A., & Foster, S. J. (2015). Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48–53. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.016>
- Categories, H., Home, S., Corner, K., Home, S., Views, T., & Geopolimer, B. (2015). BELI GMAIL U / DOMAIN Alamat Email Bisnis Mulai Uji Coba Gratis, 1–16.
- Chakraborty, Arun Kumar, D. of C. E., & University, B. E. and S. (2005). *HVFAC for Structural Applications – A Study on Technology Adaptation*. Shibhur, Howrah, West Bengal INDIA: Bengal Engineering and Science University.
- Chanh, N. Van, Trung, B. D., & E, D. V. T.-C. M. (2008). Recent research geopolymer concrete. *Civil Engineering*, 235–241.
- Cross, D., & Stephens, J. (2008). Evaluation of the Durability of 100 Percent Fly Ash Concrete, (November 2006).
- Crouch, L. K., Hewitt, R., & Byard, B. (2007). High Volume Fly Ash Concrete, 3(3), 852–856.
- Davidovits, J. (n.d.). *Geopolymer-Book-Chapter1-Davidovits*.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131–149.
- Davidovits, J. (2013). Eopolymer ement, (0), 1–11.
- Davidovits, P. J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . *Geopolymer 2002 Conference*, 1–16.
- Description, B., & Concept, D. (n.d.). TASC 2 Laboratory Building, 2–3.
- Dhakal, M., Al-masud, M., Alam, S., Montes, C., Allouche, E., & Saber, A. (2013). Design , Fabrication and Testing of a Full-Scale Geopolymer Concrete Median Barrier. *World of Coal Ash Conference*.
- Doležal, J., Škvára, F., & Kopecký, L. (2006). Concrete based on fly ash geopolymers. *Proceedings of 16th*, (1), 1–5. Retrieved from http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/documents/publikace/2007/2007_praha_dolezal_skvara_sulc_svoboda.pdf
- Dragoman, D. (2015). Nav view search, 1–7.
-

- Effendi, A. H. (2007). Natrium silikat sebagai bahan penghambat api aman lingkungan, 8(3), 245–252.
- EPRI. (n.d.). *Development of High-Volume Fly Ash*. Palo Alto, CA.
- Esdm. (2010). Rencana Strategis Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Tahun 2010-2014.
- Estakhri, C. K., & Saylak, D. (2004). Potential for Reduced Greenhouse Gas Emissions in Texas Through the Use of High Volume Fly Ash Concrete, 7(979).
- FIELD PERFORMANCE OF HIGH VOLUME FLY ASH CONCRETE - THE INDIAN EXPERIENCE by T.P.SINGH. (2007), (May).
- Fiorato, A. E., Burg, R. G., & Gaynor, R. D. (n.d.). Effects of Conditioning on Measured Compressive Strength of Concrete Cores Core conditioning involves all aspects of the storage environment :
- Fly, A., & Concretes, C. (2015). About Us Media Planner Subscribe Designing with Activated Fly ash Cement Concretes, 1–4.
- Geopolymer Concretes. (n.d.).
- Ghosh, S. (2013). Significant changes from the 2008 to the 2011 edition of ACI 318. *PCI Journal*, 142–154. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=08879672&AN=85964574&h=X8xIsp8VcFdy5%2BnC7iN7Gu8DQ2nJ2v9tbQmjwmOqwLBNxYtkeiEnXGaVO50pjuP6iiluvambDE1TksWWg2ONsw%3D%3D&crl=c>
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Research Report GC*, 94. Retrieved from http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472. <http://doi.org/10.14359/13485>
- Haynes, W. (n.d.). High-Volume Class F Fly Ash Concrete High-Volume Class F Fly Ash Concrete High-Volume Class F Fly Ash Concrete Why Class F Fly Ash ?, *Cl*.
- Hewlett, P. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Science (Vol. 58). Retrieved from http://www.dbpia.co.kr/view/ar_view.asp?arid=1536305

- High Volume Fly Ash Blended Cements: Status Report. (n.d.).
- Highway, F. (2012). Project Title : Design and Evaluation of High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete Mixes Report D : Creep , Shrinkage , and Abrasion Resistance of HVFA Concrete, (October).
- Hower, J. C., Robertson, J. D., Thomas, G. a, Wang, A. S., Schram, W. H., Graham, U. M., ... Rob, T. L. (1996). Characterization of fly ash from Kentucky power plants. *Fuel*, 75(4), 403–411.
- Hu, X., Lie, T., Polomark, G., MacLaurin, J., & Others. (2010). Thermal properties of building materials at elevated temperatures. *Building Materials*. Retrieved from <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=show&index=an&req=5753332&lang=en>
- Iler, I. for E. R. (2014). Impact of EPA's Regulatory Assault on Power Plants. Retrieved from <http://instituteeforenergyresearch.org/wp-content/uploads/2014/10/Power-Plant-Updates-Final.pdf>
- Jiang, L., Lin, B., & Cai, Y. (2000). A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 699–702. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00227-1](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00227-1)
- K, M. S. S. (2014). Strength and Behaviour of High Volume Fly Ash Concrete, 3(5), 12416–12424.
- Kamsuwan, T., & Srihirin, T. (2009). Effect of Lignosulfonate on Mechanical and Setting Time Properties of Geopolymer Paste.
- Karthikeyan H. Obla, Sushant Upadhyaya, Dimitrios Goulias, Anton K. Schindler, and N. J. C. (2008). NEW TECHNOLOGY -BASED APPROACH TO ADVANCE HIGHER VOLUME FLY ASH CONCRETE WITH ACCEPTABLE PERFORMANCE New Technology-Based Approach to Advance Higher Volume Fly Ash Concrete With Acceptable Performance.
- Khan, M. A. (2015). *Chapter 5 - Modular Bridge Construction Issues*. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-407224-4.00005-8>
- Kostakis, G. (2009). Characterization of the fly ashes from the lignite burning power plants of northern Greece based on their quantitative mineralogical composition. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2-3), 972–7. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.007>
- Kupwade-patil, K., & Allouche, E. (2011). Effect of Alkali Silica Reaction (ASR) in Geopolymer Concrete. *World of Coal Ash (WOCA) Conference, in Denver, CO, USA*, Paper 155.

- Lura, P. (2011). Drying shrinkage, 1–15.
- Madhavi, T. C., Raju, L. S., & Mathur, D. (2014). Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete, 4, 7–11. <http://doi.org/10.5923/c.jce.201401.02>
- Mandal, T., Ghosh, S., & Naik, S. (n.d.). Study on the strength of fly ash based geopolymer concrete.
- Mehta, P. K., & Meryman, H. (2009). Tools for reducing carbon emissions due to cement consumption. *STRUCTURE Magazine*, (January), 11–15. Retrieved from <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=830>
- Method, C., Formation, D., Method, G., Hardening, R. T., Strength, C., Diffraction, X., ... Matrix, B. G. (2014). August 2014 . Technical paper # 22 The European Research Project GEOASH : The development of room temperature hardening slag / fly ash- based geopolymer cements for Geopolymer Concretes When compared with the heat-cured conventional method of alkali- acti, 4(0), 0–10.
- Methods, F. T. (n.d.). The Fire Protection Handbook. *Methods*.
- Nassar, R. U. D., Soroushian, P., & Ghebrab, T. (2013). Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 78–85. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.006>
- Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2014). Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials and Design*, 57, 667–672. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064>
- Nguyen, T. T. (2009). DURABILITY OF STRUCTURE REPORT of GEOPOLYMER CONCRETE GREEN CONCRETE, (December).
- No Title. (n.d.-a), CL(414).
- No Title. (n.d.-b).
- Nugteren, H. W., & Izquierdo, M. (2009). High Strength Gopolymers Produced from coal combustion fly ash. *Global NEST Journal*, 11(2), 155–161.
- Of, P., & Concrete, G. (n.d.). Green Concrete : Cement-less Concrete. *Concrete*.
- Okesh, S. L., Umar, M. G. R. A. K., & Oganathan, S. L. (2013). Effective Utilization of High Volume Flyash with Light Weight Aggregate in Concrete for Construction Industry, 02(04).

-
- Paiva, J. M. F. De, Mayer, S., & Rezende, M. C. (2006). Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites. *Materials Research*, 9(1), 83–90. <http://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100016>
- Patel, R., Kinney, F., & Schumacher, G. (n.d.). Green concrete using 100 % fly ash based hydraulic binder, 1–15.
- Provis, J. L., & Bernal, S. a. (2014). *Binder Chemistry–Blended Systems and Intermediate Ca Content. Alkali Activated Materials*. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. <http://doi.org/10.1533/9781845696382>
- Publishers, A., & Limited, P. (2010). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, 2010(December), 68–106.
- Rangan, B. V. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection, (April).
- Rangan, B. V., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Sumajouw, D. M. J. (1987). Studies on fly ash-based geopolymer concrete. *Most*, 133–138.
- Rangan, B. V. (2005). Introducing Fly Ash-Based Geopolymer Concrete : Manufacture and Engineering Properties Introducing Fly Ash-Based Geopolymer Concrete : Manufacture and Engineering Properties.
- Reddy, B. S. K., Varaprasad, J., & Reddy, K. N. K. (2010). Strength and workability of low lime fly-ash based geopolymer concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 3(12), 1188–1189.
- Results, C. T. (n.d.). Mechanical Properties and Durability of Concrete made with HVFA Blended Cement Produced in a Cement Plant By N. Bouzoubaâ.
- review on fly ash based geopolymer concrete without portland cement.pdf. (n.d.).
- Rusjanto, H. (2010). HOW TO MAKE HIGH PERFORMANCE AND GREEN, 1–8.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47(2013), 409–418. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
-

- Şahmaran, M., Yaman, I. Ö., & Tokyay, M. (2009). Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 99–106. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.003>
- Sanjayan, J. G., Nazari, A., Chen, L., & Nguyen, G. H. (2015). Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer. *Construction & Building Materials*, 79, 236–244. <http://doi.org/10.1016/j.conbuild-mat.2015.01.043>
- Sear, L. K. a. (2001). Fly ash standards, market strategy and UK practice. *International Ash Utilization Symposium*, Paper #36.
- Semiconductors, D., & Semiconductors, D. (2004). Data sheet. *System*, (july), 1–9.
- Shah, S. P. (n.d.). DESIGN AND APPLICATION OF HIGH-VOLUME FLY ASH SELF-CONSOLIDATING CONCRETE WITH THE INCORPORATION OF Principal Investigators : David J . Corr (PI).
- Shrivastava, Y., Bajaj, K., & Ash, F. (2012). Performance of Fly Ash and High Volume Fly Ash Concrete in Pavement Design Type, 28, 188–192.
- Shrotri, K. (2006). Dynamic mechanical properties of geopolymer- polymer composites.
- Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 487–493. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.002>
- Siddique, R. (2010). Wear Resistance of High-Volume Fly Ash Concrete, (17), 21–36.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90. <http://doi.org/10.1016/j.conbuild-mat.2015.03.036>
- Sio, S., & Bekkum, V. (2015). Geopolimer lagi ..., 3–7.
- Škvára, F. (n.d.). ALKALI ACTIVATED MATERIAL – GEOPOLYMER 1 Introduction, 661–676.
- Škvára, F. (2007). Alkali activated materials or geopolymers? *Ceramics - Silikaty*, 51(3), 173–177.

-
- Solikin, M. (2007). UPAYA MENINGKATKAN PERFORMA HIGH VOLUME FLY ASH CONCRETE SEBAGAI BAHAN KONSTRUKSI RAMAH LINGKUNGAN : SEBUAH KAJIAN LITERATUR, 132–138.
- Solikin, M. (2012). High Performance Concrete with High Volume Ultra Fine Fly Ash Reinforced with Basalt Fibre.
- Soni, D. K., & Saini, J. (2014). Mechanical Properties of High Volume Fly Ash (HVFA) and Concrete Subjected to Evaluated 120 0 C Temperature, 5(3), 241–248.
- Statements, B., & Mass, D. (2013). Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement 1, 1–7. <http://doi.org/10.1520/C0186-05.2>
- Struble, L., & Hicks, J. K. (2014). Geopolymer Binder Systems, 1–213. <http://doi.org/10.1520/STP1566-EB>
- Studies, C., Projects, S. D., & Experience, G. (n.d.). Development and Application of High Volume Fly Ash Concrete (HVFAC).
- Sua-lam, G., & Makul, N. (2014). Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. *Journal of Cleaner Production*, 78, 184–194. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.060>
- Sufian Badar, M., Kupwade-Patil, K., Bernal, S. a., Provis, J. L., & Allouche, E. N. (2014). Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 79–89. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.015>
- Suganya, K. (2014). GEOPOLYMER CONCRETE AN ECO-FRIENDLY CONSTRUCTION MATERIAL, 2319–2322.
- Suhendro, B. (2014). Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. *Procedia Engineering*, 95(Scescm), 305–320. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>
- T. Kausay, & Tk., S. (2007). Acceptance of Concrete Compressive strength. *Concrete Structures*, 8(1), 54–63.
- T.Z. Harmathy. (1988). Properties of Building Materials. In *The SPFE Handbook of Fire Protection Engineering 1988* (pp. 378 – 391). Ottawa, Ontario: National Research Council Canada.
-

- Tenaga, B., & Nasional, N. (2002). Komputasi dalam sains dan teknologi nuklir xiii, 3–4.
- Terhadap, S. H., Yang, O., Dengan, I., Solikin, P. C. M., Kholishoh, S., & Setiawan, B. (2000). Progress of coal fly ash fertilizer, 10(2), 15–16.
- Thomas, M. (2007). Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, 24. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=844621>
- Tjaronge, M. W., Djamaluddin, R., & Sampebulu, V. (2014). COMPRESSION STRENGTH OF CONCRETE WITH POND ASH AS REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE, 9(12), 2923–2928.
- TR-100473.pdf. (n.d.).
- TR-100577.pdf. (n.d.).
- TR-103151.pdf. (n.d.).
- Upadhyaya, S., Goulias, D. G., & Obla, K. (2007). Evaluation of in Place Strength of High-Volume Fly Ash. *The First International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*. Retrieved from http://www.nrmca.org/research/rac_hvfa_concrete_upadhyaya_goulias_obla.pdf
- Valcke, S. L. a, Polder, R. B., Nijland, T. G., Leegwater, G. a., Visser, J. H. M., & Bigaj-Van Vliet, A. J. (2012). High filler concrete using fly ash - Chloride penetration and microstructure. *Heron*, 57(3), 169–184.
- Valentim, B., Guedes, a., Flores, D., Ward, C. R., & Hower, J. C. (2009). Variations in fly ash composition with sampling location: Case study from a Portuguese power plant. *Coal Combustion and Gasification Products*, 1(1), 14–24. <http://doi.org/10.4177/CCGP-D-09-00017.1>
- Van Dam, T. J. (2010). Geopolymer Concrete. *Concrete Pavement Technology Program*, (Davidovits 2008), 1–4.
- volume fly ash concrete Chapter1 : Role of Fly ash in. (n.d.).
- Volume, H., & Ash, F. (n.d.). merald Value. *Concrete*.
- Wallah, S. E. (2000). Drying Shrinkage of Heat-Cured Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, 3(12), 14–21.
- Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long Term Properties, 91.
- Wang, J. W., & Cheng, T. W. (2003). Production geopolymer materials by coal fly ash, 2, 263–266.

-
- Wang, X.-Y., & Park, K.-B. (2015). Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 98, 810–819. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.099>
- Wolfenden, a, Harmathy, T., Sultan, M., & MacLaurin, J. (1987). Comparison of Severity of Exposure in ASTM E 119 and ISO 834 Fire Resistance Tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 15(6), 371. <http://doi.org/10.1520/JTE11036J>
- Xie, T., Ozbakkaloglu, T., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Author ' s Accepted Manuscript.
- Yoon, S., Monteiro, P. J. M., Macphee, D. E., Glasser, F. P., & Imbabi, M. S. E. (2014). Statistical evaluation of the mechanical properties of high-volume class F fly ash concretes. *Construction and Building Materials*, 54, 432–442. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.077>
- Benz. *Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concrete: Assuring Properties and Performance*. NIST Technical Note 1812. U.S. Department of Commerce.
- Haynes High Volume Class F Fly Ash Concrete. CEE 9913
- Metha. *HIGH-PERFORMANCE, HIGH-VOLUME FLY ASH CONCRETE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT*. University of California, Berkeley, USA
- Ranganath. *High Volume Fly Ash Concrete*. Lecture-7. VTU Learning.
- Obla, dkk (2008). *New Technology-Based Approach to Advance Higher Volume Fly Ash Concrete With Acceptable Performance*. RMC Research & Education Foundation Project No. 07-09.
- Wardani, 2008. *PEMANFAATAN LIMBAH BATUBARA (FLY ASH) UNTUK STABILISASI TANAH MAUPUN KEPERLUAN TEKNIK SIPIL LAINNYA DALAM MENGURANGI PENCEMARAN LINGKUNGAN*. Pidato Pengukuhan Guru Besar, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
- Metha, 1999. *Advanced element in Concrete Technology*. Point of View: Reflections about technology choices.
- Sahmaran, dkk (2009). *Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash*. Department of Civil Engineering, Turkey.
-

- Subakti dan Kusuma (2009). *Potential for Reduced Greenhouse Gas Emissions in Indonesia Through the Use of High-Volume Fly Ash Concrete for Transportation Infrastructures*. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.2, Universitas Sepuluh November.
- Salain, dkk, 2011. *PEMANFAATAN ABU TERBANG DALAM JUMLAH BESAR PADA PEMBUATAN BETON*. Prosiding Seminar Nasional AVOERke-3. Fakultas-Teknik Universitas Udayana, Bukit Jimbaran Bali.
- Ekasanti, dkk., 2014. *Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kebutuhan Air dan Kuat Tekan High Volume Fly Ash - Selt Compacting Concrete (HVFA – SCC)*. Jurnal Matriks Teknik Sipil Vol. 2 No. 2, Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
- Umboh, 2014. *PENGARUH PEMANFAATAN ABU TERBANG (FLY ASH) DARI PLTU II SULAWESI UTARA SEBAGAI SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON*. Jurnal Sipil Statik Vol. 2 No. 7. Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi, Manado
- Soman dan Sobha (2014). *Strength and Behaviour of High Volume Fly Ash Concrete*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, University of Kerala, India.
- Aldred James, Day, John, (2012), *IS GEOPOLYMER CONCRETE A SUITABLE ALTERNATIVE TO TRADITIONAL CONCRETE?*, 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh manajemen Puslitbang Jalan dan Jembatan khususnya Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, manajemen Direktorat Teknik dan Lingkungan Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral serta Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Meulaboh, Batam, Suralaya, Embalut, Ropa, Palu dan Timika atas dukungan yang diberikan dalam melaksanakan kegiatan penelitian ini. Hal yang sama juga disampaikan kepada seluruh teknisi di Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan dan para mahasiswa jurusan teknik kimia Universitas Padjajaran yang melakukan tugas akhir di Pusjatan. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak dan ibu Narasumber serta tim teknis yang memberikan masukan dalam perjalanan kegiatan penelitian ini. Kepada PT. Indocement Tunggul Prakarsa dan PT. Cemindo Gemilang diucapkan terima kasih sebesar besarnya atas sumbangan sebagian material yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini. ■



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
www.pusjatan.pu.go.id