

Sustainability Beton Metode Life Cycle Assessment **Studi Kasus: Limbah Beton Laboratorium Bahan dan** **Konstruksi Departemen Teknik Sipil** **Universitas Diponegoro Semarang**

***Christhy Amalia Sapulete¹, Han Ay Lie², Yulita Arni Priastiwi²**

¹Institut Sains dan Teknologi Indonesia, Manokwari

²Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang

^{*)}christhy.sapulete@gmail.com

Received: 7 Mei 2018 Revised: 13 November 2018 Accepted: 15 November 2018

Abstract

Sustainability is an effort to build an infrastructure by considering the environmental impacts that occur. Concrete production as a construction material that commonly used in infrastructure development is one contributor to carbon dioxide (CO₂) emissions. CO₂ is produced from the calcination process in the manufacture of cement, burning of fossil fuels, and electrical energy used. More specifically by reviewing the calcination process on cement making, it has evaluated the consumption of cement in concrete production. The Life Cycle Assessment (LCA) is an environmental impact evaluation in terms of the life cycle of a product, wherein this paper, using the cradle-to-cradle scope, LCA is used as a method to evaluate cement consumption in concrete production to concrete waste management by taking concrete waste at Construction Laboratory and Materials Diponegoro University, Semarang for the case study. The results of the evaluation stated that the use of geopolymers concrete with fly ash as a substitute for cement could reduce up to 80% CO₂ emissions with concrete strength 75% larger than conventional concrete. And for the concrete waste management, Construction Laboratory and Materials Diponegoro University reused concrete cylinder waste as a substitute material to build the retaining wall.

Keywords: *Sustainability, cement consumption, life cycle assessment*

Abstrak

Dalam bidang teknik sipil, sustainability merupakan upaya untuk membangun suatu infrastruktur dengan mempertimbangkan dampak lingkungan yang terjadi. Produksi beton sebagai material konstruksi yang umum digunakan dalam pembangunan infrastruktur merupakan salah satu penyumbang emisi karbon dioksida (CO₂). Karbon dioksida dihasilkan dari proses kalsinasi pada pembuatan semen, pembakaran bahan bakar, serta energi listrik yang digunakan. Lebih spesifik dengan meninjau proses kalsinasi pada pembuatan semen, maka telah dievaluasi konsumsi semen pada produksi beton. Life Cycle Assessment (LCA) adalah evaluasi dampak terhadap lingkungan ditinjau dari siklus hidup suatu produk, dimana dalam penulisan ini, dengan menggunakan ruang lingkup cradle-to-cradle, LCA digunakan sebagai metode untuk mengevaluasi konsumsi semen pada produksi beton hingga manajemen limbah beton dengan mengambil studi kasus limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang. Hasil evaluasi menyatakan penggunaan beton geopolimer dengan bahan dasar fly ash sebagai pengganti semen dapat mereduksi hingga 80% emisi CO₂ dengan kekuatan beton 75% lebih besar dibandingkan dengan beton konvensional. Manajemen limbah beton yang dilakukan Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang adalah dengan menggunakan kembali limbah silinder beton pada pekerjaan pembuatan retaining wall sebagai pengganti material batu kali.

Kata kunci: *Sustainability, konsumsi semen, life cycle assessment*

Pendahuluan

The Global Competitiveness Report 2017-2018 menyatakan indeks infrastruktur Indonesia mengalami kenaikan dan menduduki peringkat ke-52 setelah pada periode sebelumnya berada pada peringkat ke-62. Pembangunan infrastruktur yang terus meningkat di Indonesia harus diimbangi dengan upaya untuk menjaga stabilitas dampak lingkungan yang terjadi. Salah satunya yaitu mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂). Karbon dioksida merupakan salah satu pembentuk gas rumah kaca di atmosfer yang menyebabkan terjadinya efek rumah kaca pada bumi. Berdasarkan pemahaman ini, maka diperlukan suatu pembangunan infrastruktur yang *sustainable*, yaitu pembangunan yang dapat menghasilkan infrastruktur yang ramah lingkungan.

Dalam buku *The Sustainable Use of Concrete*, Sakai *et al* (2013) mengemukakan beberapa sistem evaluasi yang digunakan untuk mengevaluasi sustainability, yaitu *Life Cycle Assessment (LCA)*, *Environmental Standards for Building*, *System of Environmental Impact Evaluation*, dan *Environmental Standards for Concrete Sectors*. LCA merupakan evaluasi *input*, *output* dan potensi dampak lingkungan dari suatu produk yang ditinjau dari seluruh siklus hidupnya. Evaluasi dengan LCA dapat mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan aspek lingkungan dari produk di berbagai titik dalam siklus hidupnya (Mulyana & Wirahadikusumah, 2017).

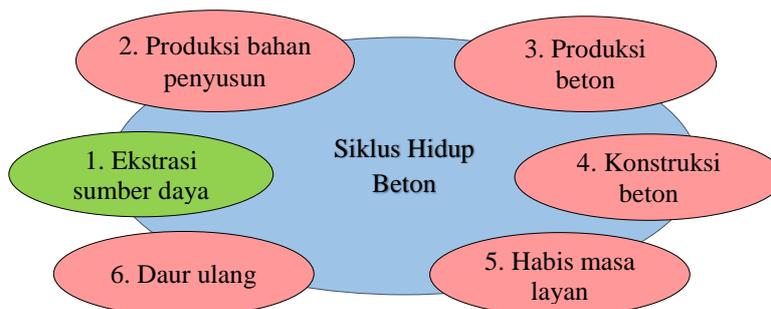
Environmental Standards for Building merupakan evaluasi yang menetapkan metode penilaian pada potensi dampak lingkungan dari konstruksi yang dibangun pada tahap pembangunan. *System of Environmental Impact Evaluation* merupakan evaluasi berbasis aplikasi. Metode ini mengurangi dampak lingkungan dengan melakukan pendekatan menggunakan sistem aplikasi. Aplikasi yang digunakan didesain untuk memberikan informasi tentang karakter lingkungan secara keseluruhan, namun hanya

dapat diaplikasikan pada satu produk dan layanan industri. *Environmental Standards for Concrete Sectors* merupakan evaluasi dengan membuat desain berdasarkan standar *environmental*. Dewasa ini beton merupakan material yang umum digunakan dalam pembangunan infrastruktur dan produksinya memiliki dampak yang berbahaya bagi lingkungan. Gambar 1 merupakan gambaran siklus hidup dari beton.

Beton konvensional terbentuk dari campuran agregat kasar dan agregat halus yang direkatkan menggunakan pasta semen. Bahan penyusun beton ini umumnya diperoleh dari proses pertambangan yang memiliki dampak langsung terhadap lingkungan yaitu berkurangnya *green area*. Dengan meninjau lebih spesifik pada produksi semen, dimana semen dihasilkan dari campuran bahan-bahan alam yang dipanaskan dengan suhu tinggi dan bereaksi membentuk kristal klinker yang kemudian dihaluskan dan menjadi bubuk semen. Proses kalsinasi ini yang menjadi salah satu industri penyumbang emisi karbon dioksida (Atmaja, 2015).

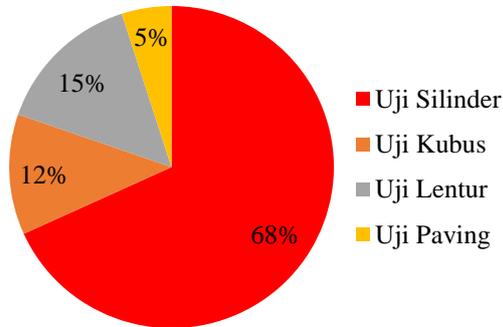
Beton geopolimer merupakan beton yang menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen, dengan menggunakan tambahan aktivator. Reaksi kimia antara *fly ash* dengan aktivator inilah yang menggantikan fungsi semen sebagai perekat agregat pada beton. Penggunaan teknologi geopolimer dapat mengurangi sekitar 80% emisi gas karbon dioksida ke atmosfer yang disebabkan oleh industri semen dan agregat (Davidovits, 1994 dan Wallah, 2014).

Data Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang tercatat telah melakukan pengujian pada material-material konstruksi, antara lain uji tekan untuk mengetahui kuat tekan beton. Lebih spesifik pada pengujian material beton, jenis beton yang diujikan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro antara lain, uji tekan pada silinder, kubus, paving, mortar, dan uji lentur pada balok.



Gambar 1. Siklus hidup beton

Persentase kubikasi total jenis uji beton yang dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang selama 7 tahun terakhir disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Data persentase kubikasi total uji beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang Tahun 2011-2017

Dalam penulisan ini akan dikaji dampak terhadap lingkungan yang terjadi ditinjau dari penggunaan beton konvensional dalam pekerjaan konstruksi dan evaluasinya dengan menggunakan sistem evaluasi LCA yang mengambil studi kasus di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang.

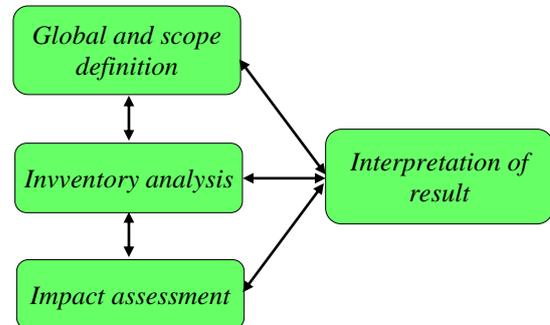
Metode

Dalam pengembangannya, penulisan paper ini menggunakan metode analisis data dan kajian literatur. Sistem evaluasi LCA mengevaluasi *sustainability* beton berdasarkan siklus hidupnya dengan meninjau dari proses ekstraksi sumber daya bahan penyusun beton, produksi beton, penggunaan beton sebagai material konstruksi hingga manajemen limbah beton, dimana setiap prosesnya dievaluasi penanganannya untuk meminimalisasi dampak terhadap lingkungan. Tahap-tahap analisis dengan menggunakan metode LCA digambarkan pada Gambar 3 (Vertech Group Sarl, 2015).

Global and scope definition

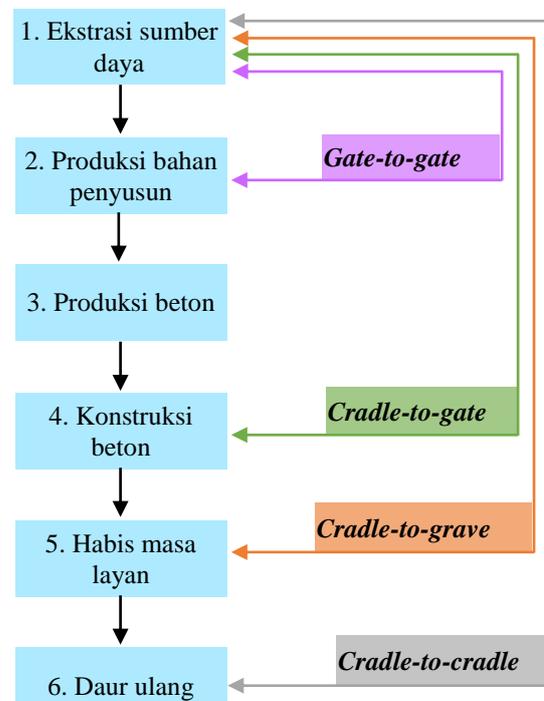
Global and scope definition merupakan tahapan untuk menentukan ruang lingkup, tujuan dan sistem batasan dalam mengevaluasi menggunakan LCA. LCA memberikan empat tipe ruang lingkup, yang ditunjukkan pada Gambar 4, dalam mengevaluasi *sustainability* (Marzuki *et al.*, 2013 dan Vertech Group Sarl, 2015), yaitu *cradle-to-cradle*, merupakan analisis yang dimulai dari proses ekstraksi sumber daya alam hingga proses *reuse* dan *recycle*; *cradle-to-grave*, proses analisis dimulai dari ekstraksi sumber daya alam hingga

selesai masa layanan konstruksi; *cradle-to-gate*, proses analisis dimulai dari proses ekstraksi sumber daya alam hingga berdirinya suatu konstruksi; *gate-to-gate*, merupakan analisis LCA terhadap siklus hidup terpendek.



Sumber: Vertech Group Sarl (2015)

Gambar 3. Tahapan analisis metode LCA



Sumber: Vertech Group Sarl (2015)

Gambar 4. Ruang lingkup analisis LCA

Inventory analysis

Dalam inventory analysis, disediakan input data yang akan dianalisis, aliran material dari produk yang ditinjau, dan output hasil akhir yang menjadi kajian evaluasi

Impact assessment

Tahap ini merupakan tahap evaluasi dampak terhadap lingkungan yang timbul dari tiap siklus hidup yang ditinjau.

Interpretation of result

Merupakan tahap akhir dari *LCA*, berisikan simpulan, rekomendasi dan pengambilan keputusan berdasarkan batasan studi dan data-data yang telah dikemukakan pada tahap-tahap sebelumnya.

System boundary

Dalam tahapan analisis dengan metode *LCA* diberlakukan *system boundary*. Pada produksi beton, karbon dioksida dihasilkan antara lain dari proses kalsinasi pada pembuatan semen, proses pembakaran bahan bakar dan penggunaan energi listrik. Dalam paper ini, *system boundary* hanya membatasi pada evaluasi emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari proses kalsinasi pembuatan semen serta evaluasi manajemen limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang.

Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis serta pembahasan tentang *sustainability* beton dengan metode *LCA* pada studi kasus limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang dijelaskan lebih lanjut dalam poin-poin sebagai berikut:

Global and scope definition

Produksi semen sebagai salah satu bahan penyusun material beton, merupakan satu dari sekian jenis industri penyumbang emisi gas rumah kaca karena proses kalsinasi pada pembuatan semen menghasilkan banyak karbon dioksida (CO_2).

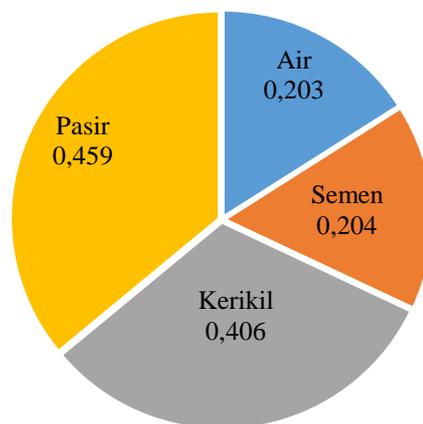
Khusus di Indonesia, terdapat banyak konstruksi yang menggunakan beton sebagai material utama sehingga produksi semen pun semakin meningkat untuk memenuhi kebutuhan konsumsi konstruksi beton. Knoema World Data (2016) menyajikan data produksi emisi CO_2 yang disumbangkan oleh Indonesia pada Tahun 2016 adalah sebesar 2,03 ton, dimana salah satunya bersumber dari proses pembuatan semen.

Inventory analysis

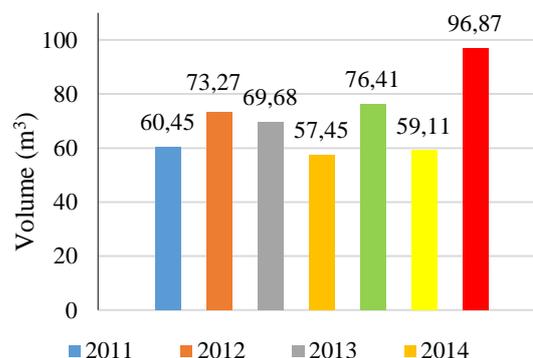
Berdasarkan data dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang, diketahui rata-rata mutu beton yang diuji adalah 35 MPa. Dengan perhitungan *mix design* menggunakan standar dari *American Concrete Institute* (ACI), pada 1 m^3 beton 35 MPa diperoleh volume komposisi bahan penyusun,

yakni agregat, semen dan air masing-masing ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 6 menunjukkan data volume limbah beton dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang selama kurun waktu 2011-2017



Gambar 5. Volume komposisi bahan penyusun beton mutu 35 MPa dengan *mix design* metode ACI..



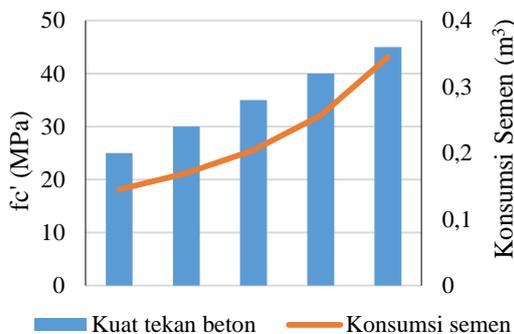
Gambar 6. Data volume limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang Tahun 2011-2017

Impact assessment

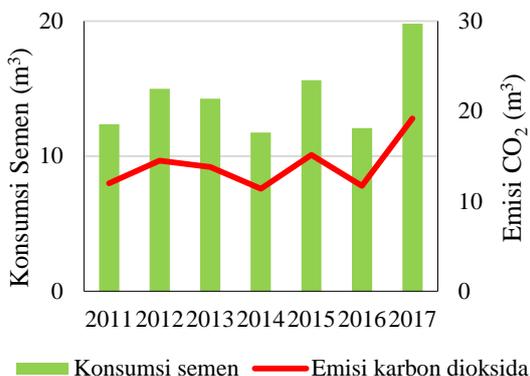
Hasil perhitungan *mix design* metode ACI, dibutuhkan 0,204 m^3 semen untuk membuat 1 m^3 beton mutu 35 MPa. Pada Gambar 7 menunjukkan grafik yang menyatakan peningkatan mutu beton terhadap konsumsi semen. Dimana hal ini berarti bahwa semakin tinggi mutu beton, semakin besar pula konsumsi semen yang digunakan.

Dalam Gambar 8 disajikan data konsumsi semen hasil limbah beton serta emisi CO_2 yang dihasilkan akibat proses kalsinasi Laboratorium

Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang Pada Tabel 1 diperoleh nilai emisi karbon dioksida (CO₂). Nilai tersebut dihitung dengan menggunakan rumus, pada Persamaan (1), dengan pendekatan sebagai berikut (Damayanti & Lestari, 2011):



Gambar 7. Grafik peningkatan kuat tekan beton terhadap konsumsi semen



Gambar 8. Data konsumsi semen dan emisi CO₂

$$\text{Emisi CO}_2 = V_{\text{semen}} \times C_{\text{klinker}} \times \text{EF}_{\text{klinker}} \quad (1)$$

Dimana Emisi CO₂ merupakan Emisi CO₂ dari produksi semen (m³), V_{se} merupakan Volume konsumsi semen (m³), C_{klinker} merupakan Fraksi klinker dalam semen, EF_{klinker} merupakan Faktor emisi klinker dalam semen.

Damayanti & Lestari (2011) memberikan penjelasan nilai default faktor emisi dari produksi klinker (EF_{klinker}) adalah 0,51 ton CO₂ per ton klinker. Faktor emisi ini perlu dikoreksi dengan adanya *cement kiln dust* (CKD) dengan faktor koreksi CKD adalah 2% dan nilai untuk fraksi klinker (C_{klinker}) adalah 95% berdasarkan pedoman yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup (2012).

Contoh perhitungan:

Data limbah beton Tahun 2017 adalah 19,81 m³. Faktor emisi masing-masing C_{klinker} = 0,152 × 2 =

1,02 dan EF_{klinker} = 95%, sehingga emisi CO₂ Tahun 2017 adalah 19,81 m³ × 1,02 × 95% = 19,19 m³

Tabel 1. Data konsumsi semen dan emisi CO₂ tiap tahun berdasarkan data limbah Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang

Tahun	Volume (m ³)	Emisi CO ₂ (m ³)
2011	12,36	11,98
2012	14,98	14,52
2013	14,25	13,81
2014	11,75	11,38
2015	15,63	15,14
2016	12,09	11,71
2017	19,81	19,19

Dengan peningkatan konsumsi semen, maka semakin meningkat pula produksi gas CO₂. Produksi semen sendiri memberikan banyak dampak terhadap lingkungan. Gas rumah kaca terbentuk karena adanya peningkatan konsentrasi gas CO₂ dan gas-gas lainnya di atmosfer. Alaminya, bila produksi gas CO₂ pada batas yang wajar tidak menimbulkan bahaya karena CO₂ dibutuhkan untuk membantu tumbuhan hijau melakukan fotosintesis. Namun meningkatnya produksi gas CO₂ secara berlebihan melebihi kemampuan tumbuhan untuk menyerapnya. Salah satunya penyumbang emisi CO₂ bersumber dari proses kalsinasi pada pembuatan semen dan berkurangnya *green area* karena proses penambangan sumber daya alam menyebabkan berkurangnya proses penyerapan CO₂.

Disisi lain ditinjau pula limbah beton sisa dari pengujian di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang, seperti ditampilkan pada Gambar 9. Dengan limbah beton yang menumpuk menyebabkan terjadinya pencemaran tanah dan pencemaran udara akibat debu dari limbah beton.

Interpretation of result

Berdasarkan data, dapat disimpulkan dua hal sebagai *interpretation of result*, yaitu bahwa konsumsi semen bergantung pada tingkat kebutuhan beton sebagai material konstruksi dan dengan meningkatnya kebutuhan konstruksi beton, semakin meningkat pula konsumsi semen yang menyebabkan peningkatan produksi karbon dioksida (CO₂). Uji beton yang dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang tiap tahunnya mengalami peningkatan juga penurunan, namun dengan peningkatan dan penurunan konsumsi semen (Gambar 10), emisi CO₂ terus meningkat dan

terkonsentrasi di atmosfer, sehingga terus menambah produksi gas rumah kaca.



a. Limbah uji tekan silinder beton



b. Limbah uji lentur



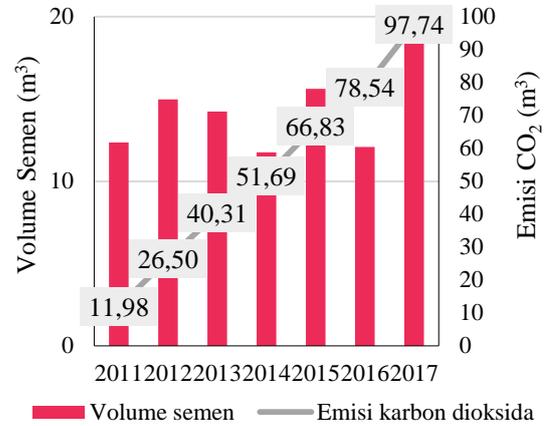
c. Penumpukan limbah silinder beton

Gambar 9. Limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang (dokumentasi 28 Maret 2018)

a. *Fly ash* sebagai pengganti semen

Berangkat dari masalah lingkungan yang timbul akibat konsumsi semen, maka menghasilkan beton yang *sustainable* menjadi suatu kewajiban pada masa kini untuk meminimalisir dampak lingkungan yang terjadi. Salah satu inovasi yang dikembangkan beberapa tahun terakhir adalah pembuatan beton geopolimer.

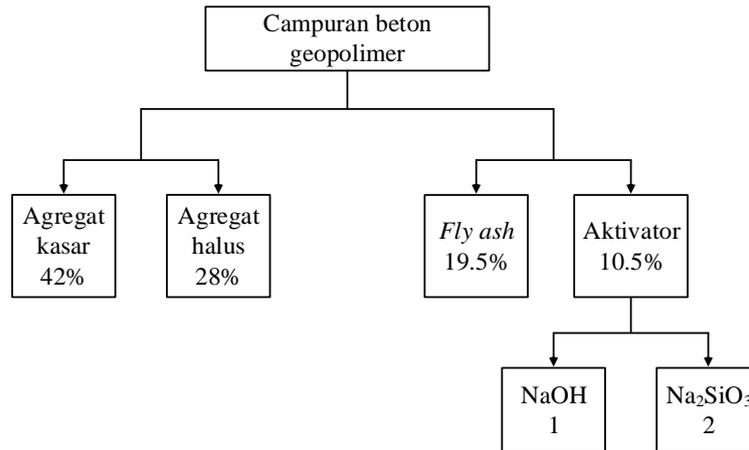
Pasta geopolimer diperoleh dari pengikatan akibat reaksi kimia yang terjadi pada pencampuran *fly ash* dengan aktivator. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Ekaputri & Triwulan (2013) dan Mulyana & Yolanda (2017),



Gambar 10. Grafik peningkatan emisi CO₂ Tahun 2011-2017

Farizka & Darma (2018) melanjutkan penelitian dengan membuat studi eksperimental pengaruh aktivator pada beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* tipe F, yang berasal dari sisa pembakaran batu bara, dengan komposisi larutan aktivator dan *fly ash* adalah 0,65 : 0,35. Larutan aktivator yang digunakan adalah sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silika (Na₂SiO₃) dengan komposisi berturut-turut 1:2 (Gambar 11). Komposisi *mix design* pada beton geopolimer dan beton konvensional, yaitu proporsi agregat pada kedua beton adalah 70%, proporsi semen pada beton konvensional sama dengan *fly ash* pada beton geopolimer, yaitu 19,5%, serta proporsi air pada beton konvensional sama dengan larutan aktivator pada beton geopolimer, yaitu 10,5%. Dengan komposisi tersebut diperoleh hasil kuat tekan beton geopolimer lebih besar dibandingkan dengan beton konvensional.

Salah satu faktor penentu dalam penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen adalah tingkat konsentrasi larutan aktivator atau yang disebut dengan molaritas. Penelitian terdahulu dilakukan oleh Ekaputri dan Triwulan (2013), menyatakan bahwa nilai kuat tekan beton dipengaruhi oleh besarnya molaritasnya larutan aktivator. Berdasarkan studi eksperimental dari penelitian terdahulu, diketahui bahwa komposisi NaOH dan Na₂SiO₃ berturut-turut 1:2 dinilai sebagai komposisi yang ideal untuk digunakan. Komposisi ini dianggap ideal karena jika konsentrasi molar yang digunakan semakin ditingkatkan lagi, maka semakin kental larutan yang dihasilkan dan semakin sulit pengerjaannya (*workability*).



Sumber: Mulyana & Yolanda (2017)

Gambar 11. Mix design beton geopolimer

Dalam pengujiannya, Farizka & Darma (2018) juga menjelaskan bahwa beton geopolimer memiliki *setting time* dan *final setting* yang lebih lama dibanding dengan beton konvensional, sehingga pada umur awal peningkatan kuat tekan beton lebih tinggi dibanding beton geopolimer. Namun saat umur 28 hari, kuat tekan beton geopolimer mencapai 75% lebih besar dibandingkan dengan beton konvensional.

Berdasarkan pengujian-pengujian yang telah dilakukan pada beton geopolimer dengan hasil kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton konvensional, sehingga menjadi perhatian khusus dalam mempertimbangkan penggunaan beton geopolimer dalam pembangunan konstruksi beton di Indonesia.

b. Manajemen limbah beton di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang

Dengan menggunakan ruang lingkup *cradle-to-cradle* sebagai standar evaluasi LCA, maka ditinjau pula upaya daur ulang limbah beton. Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang melakukan inovasi dalam mengelola limbah beton. Benda uji silinder beton, salah satu jenis beton yang diujikan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang, sebagai limbah beton kemudian digunakan kembali (*reuse*) sebagai material pengganti batu kali untuk membuat *retaining wall* di lingkungan Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Diponegoro Semarang (Gambar 12). Penggunaan kembali limbah beton juga meningkatkan nilai ekonomis dari pekerjaan *retaining wall*. Dengan upaya *reuse*, konsumsi batu kali yang diperlukan untuk pekerjaan *retaining wall* dapat digantikan beton

silinder sebagai bentuk manajemen limbah beton yang dilakukan oleh Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang.

Kesimpulan

Dengan menggunakan data limbah dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang, diperoleh hasil bahwa konstruksi beton yang *sustainable*, dapat dihasilkan dengan menggunakan beton geopolimer sebagai bahan konstruksi untuk menggantikan beton konvensional. Tidak hanya menggantikan bahan dasar pada beton yang menjadikannya *sustainable*, namun upaya untuk mendaur ulang limbah beton juga diperlukan. Limbah beton yang dapat dimanfaatkan dan dikelola dengan baik dapat pula meminimalisasi dampak lingkungan yang terjadi karena dapat menekan industri penambangan yang menjadi penyebab hilangnya *green area*. Dalam hal ini limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang melakukan *reuse* limbah beton silinder sebagai material untuk pekerjaan pembuatan *retaining wall* menggantikan material batu kali yang biasanya digunakan pada pekerjaan pembuatan *retaining wall*.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Kepala Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang beserta laboran dan pegawai, atas kerjasama dan kepercayaannya kepada penulis sehingga penulisan paper ini dapat selesai dengan baik dengan menggunakan pada data limbah beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang.



(a). Pekerjaan pembuatan *retaining wall*



(b). *Retaining wall* dengan menggunakan limbah silinder beton

Gambar 12. Reuse limbah beton silinder sebagai material pembuat *retaining wall* di lingkungan Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro Semarang (dokumentasi 28 Maret 2018)

Daftar Pustaka

- Atmaja, I. G. D. (2015). Industri Semen dan Emisi Carbon Dioxide (CO₂) di Pulau Jawa. *Media Bina Ilmiah*, 9(2), 63–65.
- Damayanti, S., & Lestari, P. (2011). Inventarisasi Emisi CO₂ dari Proses Kalsinasi pada Industri Semen di Indonesia Berdasarkan IPCC Guidelines 2006. *Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan. Institut Sains dan Teknologi Bandung*, 1–12.
- Davidovits, J. (1994). High-alkali Cements for 21st Century Concretes. *ACI Concrete International*, 144, (383-397)
- Ekaputri, J. J., & Triwulan. (2013). Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer, 20(1), 1–10.
- Farizka, & Darma. (2018). Studi Experimental Pengaruh Perbedaan Molaritas. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 7, 89–98.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2012). *Pedoman penyelenggaraan inventaris gas rumah kaca nasional, metodologi penghitungan tingkat emisi gas rumah kaca proses industri dan penggunaan produk (IPPU)*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Knoema World Data. Indonesia-CO₂ Emissions per Capita. (2016).
- Marzuki, P. F., Abduh, M., & Driejana, R. (2013). Peran Life Cycle Analysis (LCA) pada Material Konstruksi dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbon Dioksida pada Efek Gas Rumah Kaca. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7)*, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Mulyana, A., & Wirahadikusumah, D. R. (2017). Analisis Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Tahap Konstruksi Studi Kasus : Konstruksi Jalan Cisumdawu. *Jurnal Teknik Sipil ITB*. ISSN No. 0853-2982, 24(3), 269–280.
- Mulyana, F., & Yolanda, T. (2017). Studi Properties Beton Geopolimer Sebagai Substitusi Beton Konvensional. *Skripsi*, Semarang: Universitas Diponegoro.
- Sakai, Koji, & Noguchi, Takafumi. (2013). *The sustainability use of concrete*. CRC Press.
- The Global Competitiveness Report The Global Competitiveness Report 2017-2018. (2017). *World Economic Forum*, 5.
- Vertech Group Sarl. (2015). *LCA scope and analysed system boundaries definition of limits and functional Units*. LCA Preparation.
- Wallah, S. E. (2014). Pengaruh Perawatan dan Umur terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(1), 1–7.