

POTENSI PENGGUNAAN PASIR LAHAR DINGIN GUNUNG SINABUNG SEBAGAI CAMPURAN BETON

Rika Deni Susanti¹, Aazokhi Waruwu², Debby Endriani³, Indra Lesmana⁴

^{1,3}Jurusan Teknik Sipil, Universitas Amir Hamzah,

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan,

⁴Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan

Informasi Makalah

Dikirim, 17 Juli 2021
Direvisi, 3 Mei 2022
Diterima, 29 September 2022

Kata Kunci:

Beton
Pasir lahar dingin
Pasir sungai
Kuat tekan beton

INTISARI

Kemajuan pembangunan berbanding lurus dengan kebutuhan konstruksi beton. Beton memerlukan inovasi dalam penggunaan material utama maupun bahan tambahan untuk meningkatkan kinerja yang kuat, kokoh, dan tanah lama. Banyak upaya yang dilakukan dalam inovasi material yang digunakan, namun perlu pertimbangan efektifitas dan daya guna dari material. Salah satu limbah erupsi gunung berapi yang dapat dimanfaatkan adalah pasir lahar dingin. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan potensi pasir lahar dingin sebagai pengganti pasir sungai dalam meningkatkan kuat tekan beton. Pasir lahar dingin dari limbah erupsi Gunung Sinabung digunakan dengan variasi 0-100% untuk mengganti pasir sungai yang biasa digunakan. Beton yang menggunakan pasir lahar dingin diuji dengan alat kuat tekan untuk melihat sejauh mana material ini meningkatkan kuat tekan beton. Hasil penelitian dari uji kubus beton menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton dengan pasir lahar dingin lebih tinggi daripada kuat tekan beton pasir sungai. Peningkatan maksimum terjadi pada penggunaan 60-70% pasir lahar dingin. Potensi pasir lahar dingin dalam meningkatkan kuat tekan didapatkan sekitar 1,4 kali lebih tinggi dari kuat tekan beton biasa dengan pasir sungai.

ABSTRACT

Infrastructure progress is directly proportional to the need for concrete construction. Concrete requires innovation in the use of the main material as well as additional materials to improve performance, which is strong, sturdy, and durable. Many efforts have been made to innovate the materials used, but it is necessary to consider the effectiveness and usability of the materials. One of the volcanic eruption waste that can be utilized is cold lava sand. This study aims to obtain the potential of cold lava sand as a substitute for river sand in increasing the compressive strength of concrete. Cold lava sand from the eruption of Mount Sinabung was used with a variation of 0-100% to replace the river sand that is commonly used. Concrete using cold lava sand is tested with a compressive strength test to see how far this material increases the compressive strength of concrete. The results of the concrete cube test show that the compressive strength of concrete with cold lava sand is higher than the compressive strength of river sand concrete. The maximum increase occurs at the use of 60-70% cold lava sand. The potential of cold lava sand in increasing the compressive strength is found to be about 1.4 times higher than the compressive strength of ordinary concrete with river sand.

Korespondensi Penulis:

Rika Deni Susanti
Jurusan Teknik Sipil
Institut Teknologi Medan
JL. Gedung Arca No. 52 Medan, 20217
Email: razzanrikadani@yahoo.com

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan di bidang teknologi rekayasa struktur di Indonesia, penggunaan beton masih merupakan pilihan utama pada pekerjaan konstruksi seperti pembangunan gedung, jembatan, bendungan, dan sebagainya. Pembuatan beton dapat dilakukan dengan mencampurkan agregat halus, agregat kasar, semen portland, air, dan bahan tambah. Semakin meluasnya penggunaan beton dan semakin meningkatnya pembangunan menunjukkan betapa tingginya kebutuhan akan beton di masa yang akan datang, sehingga menuntut inovasi-inovasi baru mengenai material untuk campuran beton.

Inovasi material beton ada yang menggunakan campuran sika untuk pembuatan bata ringan [1]. Material lain yang sudah digunakan adalah zat adiktif *Fosroc SP 337* yang berfungsi untuk mengurangi penggunaan kadar semen tanpa harus mengurangi kuat tekan beton dan untuk memperlambat waktu pengerasan beton [2]. Penggunaan *fly ash* sebagai campuran beton dapat menggantikan 50% semen, penambahan 0,4% *superplasticizer* dapat meningkatkan kuat lentur beton sampai 13,38% [3]. Akan tetapi *fly ash* membutuhkan setidaknya 90 hari dalam mencapai kuat tekan maksimum, ini disebabkan lamanya proses reaksi *fly ash* dengan material beton lainnya [4]. Kondisi ini dapat menyulitkan pada proses pengerasan beton struktur di lapangan.

Material pengganti sebagian pasir dapat menggunakan limbah *bottom ash*, akan tetapi material ini hanya dapat digunakan untuk mengganti sekitar 10% pasir sungai, lebih dari itu nilai kuat tekan beton menjadi berkurang dan lebih kecil daripada kuat tekan beton yang menggunakan 100% pasir sungai [5]. Pengganti material pasir dapat menggunakan batu apung, tetapi kuat tekan yang didapatkan masih lebih rendah dari beton konvensional yang menggunakan pasir sungai [6]. Okwadha & Ngengi, (2016) [7] menggunakan *volcanic pyroclastics* sebagai pengganti sebagian pasir sungai, efektif sampai 50% mengganti sebagian pasir sungai, di atas 50% menyebabkan penurunan kuat tekan beton. Penggunaan agregat daur ulang yang diayak dari pecahan beton bekas telah diteliti oleh [8], hasil penelitian menunjukkan penggunaan 50% dan 100% agregat daur ulang menghasilkan penurunan kuat tekan beton.

Material beton dari erupsi Gunung Sinabung dapat berupa abu vulkanik dan pasir lahar dingin. Abu vulkanik dari erupsi Gunung Sinabung dapat digunakan sebanyak 5% sebagai pengganti semen untuk mendapatkan beton struktural [9]. Bahkan hasil penelitian (Susanti, et al., 2018) [10], peningkatan kuat tekan beton dengan abu vulkanik Gunung Sinabung hanya terjadi pada campuran 2%. Butiran halus abu vulkanik dapat mengisi rongga di antara agregat, sehingga mengurangi rongga dan meningkatkan kuat tekan beton [11]. Inovasi penggunaan material abu vulkanik dikembangkan sebagai campuran aspal beton untuk perkerasan jalan [12]. Hal ini menunjukkan pengembangan penggunaan limbah erupsi gunung berapi.

Lahar dingin terjadi akibat terjadinya hujan di puncak gunung dan mengakibatkan material yang berada dalam gunung keluar mengalir melalui aliran sungai. Bahan-bahan agregat halus atau pasir sebagai bahan pengisi dapat diganti dengan pasir lahar dingin. Dampak negatif dari banjir lahar dingin tersebut menyebabkan kerusakan pada lembah sungai dan wilayah di sekitar sungai yang dilalui aliran lahar dingin berupa lahan pemukiman, persawahan, jalan, dan jembatan. Lahan pemukiman dan persawahan tersebut berubah menjadi lahan kosong yang dipenuhi material vulkanik dan hanya menjadi limbah padat tidak digunakan. Bale (2011) [13] menyatakan bahwa pasir lahar dingin hasil erupsi Merapi mempunyai karakteristik cukup baik, dan setara dengan pasir sungai.

Pasir lahar dingin dapat diambil di bagian hulu, tengah, dan hilir sungai. Lokasi pengambilan ini berpengaruh pada perilaku pasir dan kuat tekan beton. Pasir di bagian hilir lebih halus daripada bagian tengah dan bagian hulu, nilai kuat tekan beton yang menggunakan pasir lahar dingin di bagian hilir memberikan peningkatan kuat tekan beton yang lebih baik dibandingkan bagian lainnya dan lebih tinggi daripada kuat tekan beton yang menggunakan pasir sungai [13].

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu pengembangan pemanfaatan material vulkanik berupa pasir lahar dingin Gunung Sinabung sebagai pengganti pasir sungai. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan pasir lahar dingin hasil erupsi Gunung Sinabung sebagai bahan pengganti pasir sungai terhadap kuat tekan beton.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Persiapan Material Beton

Material campuran beton yang dipersiapkan terdiri dari semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Semen merupakan salah satu bahan perekat yang jika dicampur dengan air mampu mengikat bahan-bahan

padat seperti pasir dan batu menjadi suatu kesatuan. Agregat dibedakan menjadi dua yaitu agregat kasar (kerikil) dan agregat halus (pasir). Agregat kasar yaitu agregat yang butirannya memiliki ukuran lebih besar dari 4,75 mm. Agregat halus yaitu agregat yang butirannya lolos ayakan 4,75 mm. Penggunaan air dalam pembuatan beton adalah untuk memicu proses kimiawi dari semen. Senyawa yang terkandung dalam air akan mempengaruhi kualitas dari beton, untuk itu diperlukan standar yang baik untuk kualitas air. Air dan semen akan menghasilkan reaksi kimia maka diperlukan perbandingan atau faktor air semen yang baik akan menghasilkan kualitas beton yang baik.

Pada penelitian ini semen yang digunakan ialah semen padang jenis semen *Portland* tipe I (*Ordinary Portland Cement*). Pasir sungai yang digunakan adalah pasir yang diambil dari pasir sungai Pancur Batu – Sumatera Utara. Pada penelitian ini Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah diperoleh dari Kecamatan Patumbak, Kabupaten Deli Serdang - Sumatera Utara.

Pasir lahar dingin dari limbah erupsi gunung berapi dapat berfungsi menggantikan agregat halus (pasir) dari sungai yang sudah umum digunakan untuk campuran beton. Pasir lahar dingin Gunung Sinabung diambil di bagian hilir sungai (Gambar 1). Bagian ini lebih halus dibandingkan bagian tengah dan hulu sungai. Penggunaan pasir lahar dingin dapat dicampur secara langsung tanpa harus dicuci dan dibersihkan terhadap lumpur [13]. Kelipatan penggunaan pasir lahan dingin setiap 10% merujuk pada penambahan batu apung yang diteliti oleh [6].



Gambar 1. Material pasir lahar dingin

2.2. Pengujian Kuat Tekan Beton

Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Institut Teknologi Medan. Material campuran beton pada umumnya terdiri dari semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Pengujian dari material yang digunakan diperlukan untuk mengetahui karakteristik dari masing-masing material, sehingga mendapatkan mutu beton yang optimal sesuai dengan yang direncanakan. Perancangan campuran beton yang tepat dan sesuai dengan proporsi campuran adukan beton sangat diperlukan untuk mendapatkan kualitas beton yang baik.

Pengujian *slump* dilakukan pada campuran beton setiap perubahan jumlah pasir lahar dingin. *Slump* merupakan pedoman yang digunakan untuk mengetahui tingkat kelecakan suatu adukan beton, semakin tinggi tingkat kekenyalan, maka semakin mudah pengerjaannya. Pengujian dilakukan menggunakan alat *slump test* berupa kerucut Abrams dengan dengan bagian atas dan bawah terbuka, diameter atas 102 mm, diameter bawah 203 mm, dan tinggi 305 mm. Jumlah benda uji, variasi campuran, dan umur beton yang digunakan diuraikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sampel benda uji

Pasir lahar dingin (%)	Jumlah benda uji	
	7 hari	14 hari
0	3	3
10	3	3
20	3	3
30	3	3
40	3	3
50	3	3
60	3	3
70	3	3
80	3	3
90	3	3

Cetakan untuk mencetak beton segar menggunakan cetakan kubus berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Beton yang sudah dicetak dipadatkan dan digetarkan pada meja getar. Perawatan dilakukan setelah beton mencapai batas *final setting*, artinya beton telah mengeras. Perawatan ini dilakukan agar proses hidrasi selanjutnya tidak mengalami gangguan. Jika hal ini terjadi, beton akan mengalami keretakan karena kehilangan air yang begitu cepat. Perawatan beton dengan cara pembasahan dengan menaruh beton segar dalam genangan air. Bak perendam berfungsi untuk merendam sampel yang telah dikeluarkan dari cetakan (Gambar 2).

Kekuatan tekan beton akan bertambah dengan naiknya umur beton. Umur beton yang diteliti untuk melihat potensi pasir lahar dingin adalah 7 hari dan 14 hari. Berdasarkan hasil penelitian Desmaliana et al., (2018) [14], didapatkan bahwa peningkatan kuat tekan beton dimulai pada umur 7 hari, sedangkan kuat tekan beton di atas 14 hari tidak memperlihatkan peningkatan yang signifikan. Hal yang sama didapatkan pada penelitian Susanti et al., (2018) [5], nilai kuat tekan 14 hari sebesar 22,83 MPa hampir sama dengan kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 22,83 MPa.

Nilai kuat tekan beton didapatkan melalui tata cara pengujian standar, menggunakan mesin uji dengan cara memberikan beban bertahap dengan kecepatan peningkatan beban tertentu menggunakan benda uji berupa kubus berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Selanjutnya benda uji ditekan dengan mesin tekan sampai pecah (Gambar 3). Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan untuk mengetahui seberapa besar kapasitas beton mampu menahan beban tekan maksimum. Beban tekan maksimum yang terjadi sampai mencapai benda uji pecah dibagi dengan luas penampangnya merupakan nilai kuat tekan beton yang dinyatakan dalam satuan MPa atau kg/cm².



Gambar 2. Benda uji beton – pasir lahar dingin



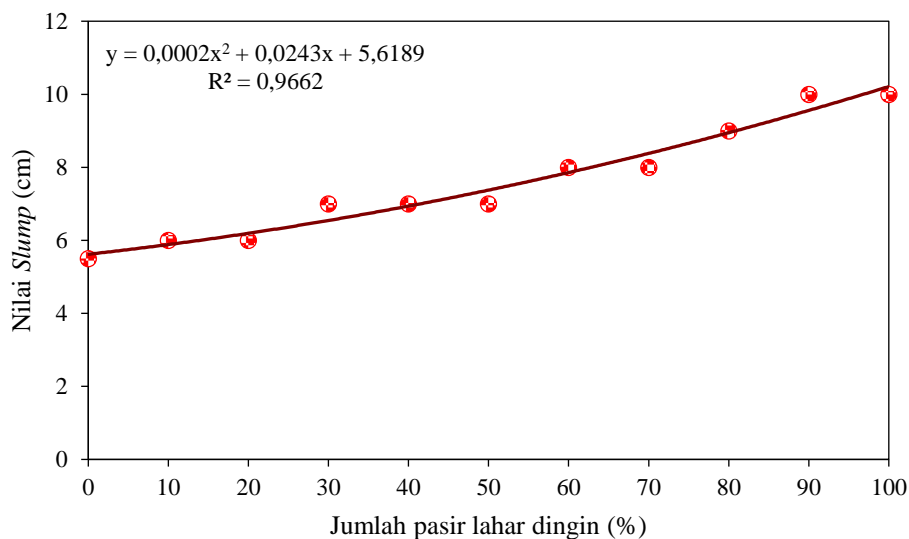
Gambar 3. Uji kuat tekan beton

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil penelitian dan pembahasan secara komprehensif. Hasil disajikan dalam bentuk grafik dari analisis nilai *slump*, nilai kuat tekan beton dari masing-masing jumlah penggunaan pasir lahar dingin (0-100%) pada setiap umur beton, perbandingan kuat tekan beton, dan peningkatan kuat tekan beton pasir lahar dingin dengan pasir sungai.

3.1. Hasil Uji Beton – Pasir Lahar Dingin

Campuran beton yang akan dicetak dalam cetakan kubus terlebih dahulu diuji dengan *slump test*. Hasil uji *slump* pada setiap benda uji dengan campuran pasir lahar dingin ditunjukkan dalam Gambar 4. *Slump* pada dasarnya merupakan salah satu pengetesan sederhana untuk mengetahui *workability* beton segar sebelum diterima dan diterapkan dalam pekerjaan pengecoran kubus beton. *Slump* merupakan tinggi dari adukan dalam kerucut terpancung terhadap tinggi adukan setelah cetakan diambil. *Slump* merupakan pedoman yang digunakan untuk mengetahui tingkat kelecakaan suatu adukan beton, semakin tinggi tingkat kekenyalan, maka semakin mudah pengerjaannya dalam pengecoran, namun ada batasan nilai yang harus dipenuhi. Menurut Iskandar et al., (2005) [15], nilai *slump* minimum adalah 2,5 cm, sedangkan nilai maksimum disesuaikan dengan keperluan beton, nilai *slump* maksimum untuk dinding pelat, pondasi, lantai beton, pekerjaan jalan sebesar 7,5 cm dan untuk balok, kolom dinding beton sebesar 10 cm. Nilai *slump* dari campuran beton dengan pasir lahar dingin didapatkan meningkat dengan semakin banyaknya pasir lahar dingin yang digunakan. Nilai *slump* terlihat masih dalam range nilai *slump* yang disyaratkan dan memenuhi syarat untuk diterima dan diterapkan pada campuran beton untuk dicetak dalam cetakan kubus.



Gambar 4. Nilai slump dari setiap penambahan pasir lahar dingin

Hasil uji kuat tekan pada benda uji dengan umur beton 7 hari dan kuat tekan beton dengan umur beton 14 hari ditunjukkan pada Tabel 2. Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kekuatan desak beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar berupa batu pecah dan agregat halus berupa pasir dari sungai dan pasir lahar dingin, dan air secukupnya. Perbandingan air semen merupakan faktor utama dalam menentukan kekuatan beton. Semakin rendah perbandingan air semen, semakin tinggi kekuatan desaknya.

Hasil uji didapatkan dari rata-rata kuat tekan dari 3 (tiga) benda uji yang diteliti. Umur beton 7 hari menunjukkan pola peningkatan secara linier seiring dengan bertambahnya jumlah pasir lahar dingin, hal ini memungkinkan pola peningkatan kuat tekan terjadi peningkatan. Hal berbeda didapatkan dari hasil uji kuat tekan beton pada umur 14 hari. Pola peningkatan kuat tekan beton mencapai puncak pada jumlah pasir lahar dingin tertentu dan sedikit menurun pada jumlah yang lebih besar. Namun secara keseluruhan kuat tekan beton dengan pasir lahar dingin masih lebih tinggi daripada kuat tekan beton dengan pasir sungai baik untuk umur beton 7 hari maupun untuk umur beton 14 hari.

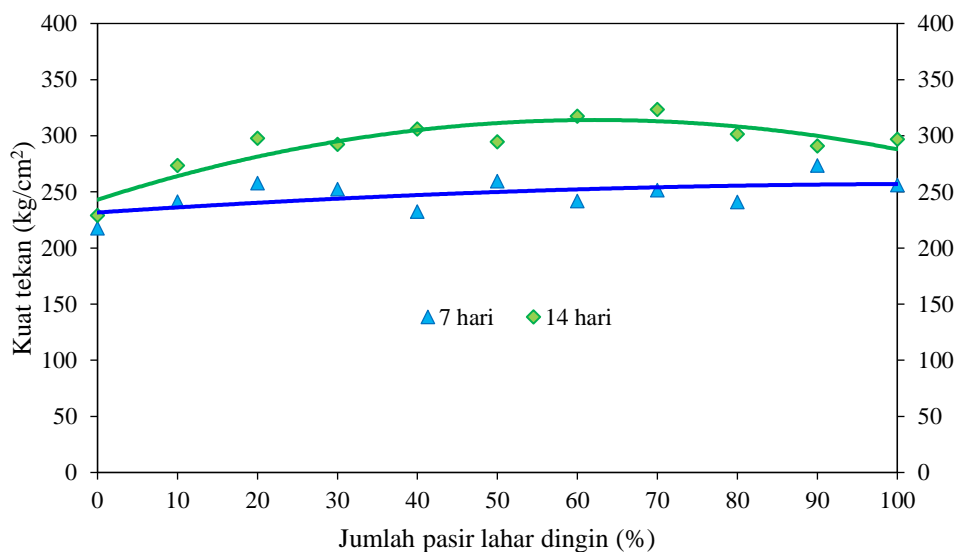
Tabel 2. Kuat tekan benda uji

Pasir lahar dingin (%)	Rerata Kuat Tekan (kg/cm ²)	
	7 hari	14 hari
0	218	229
10	241	273
20	258	298
30	252	292
40	232	306
50	260	295
60	242	317
70	252	323
80	241	301
90	273	291
100	256	297

3.2. Pengaruh Pasir Lahar Dingin Terhadap Kuat Tekan Beton

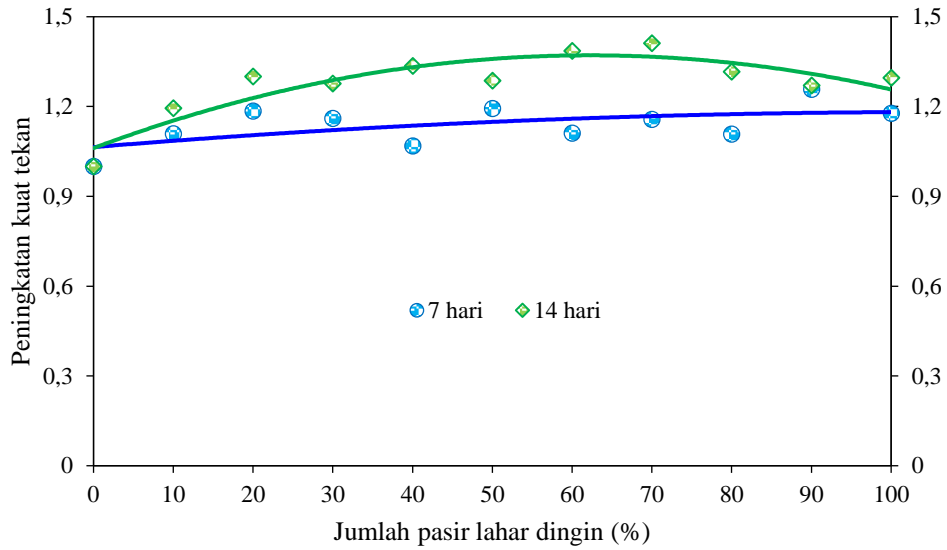
Pengaruh pasir lahar dingin terhadap kuat tekan beton pada umur beton yang berbeda diperlihatkan pada Gambar 5. Peningkatan kuat tekan beton dengan pasir lahar dingin terlihat pada setiap jumlah campuran. Semakin banyak pasir lahar dingin yang digunakan, kuat tekan beton semakin meningkat kecuali pada jumlah pasir lahar dingin 80-100% untuk umur 14 hari sedikit menurun dari nilai kuat tekan 70% pasir lahar dingin.

Berdasarkan hasil uji kandungan pasir lahar dingin, didapatkan unsur silika (SiO₂) sebesar 59,4%, nilai ini tidak berbeda jauh dengan abu vulkanik yang diteliti oleh [16], dimana kandungan silika abu vulkanik sekitar 54-55%. Kandungan yang dimiliki oleh material ini dapat mempengaruhi kuat tekan beton. Kandungan silika meningkatkan sifat pozzolan pada beton berupa reaksi material terhadap air yang menyebabkan proses hidrasi dan mempercepat pengerasan pada beton [3].



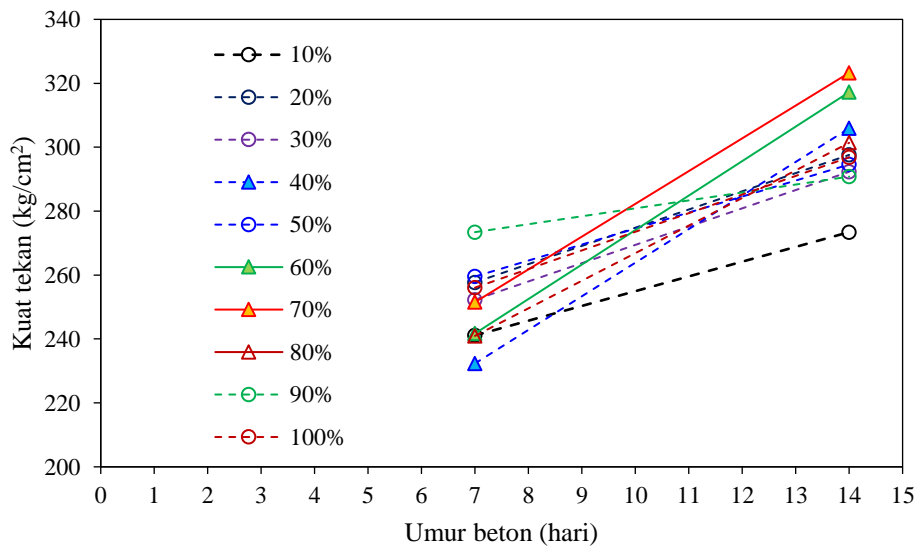
Gambar 5. Pengaruh pasir lahar dingin terhadap kuat tekan beton

Peningkatan kuat tekan beton akibat penggunaan pasir lahar dingin pada umur beton yang berbeda diperlihatkan pada Gambar 6. Peningkatan ini ditentukan dari perbandingan kuat tekan dengan pasir lahar dingin dan kuat tekan dengan pasir sungai. Peningkatan terbaik terjadi pada penggunaan pasir lahar dingin sebanyak 60-70%, peningkatan yang terjadi didapatkan sebesar 1,39-1,41. Peningkatan ini cukup memberikan dampak dalam penggunaan pasir lahar dingin. Kuat tekan maksimum dapat dicapai dengan penggunaan 70% pasir lahar dingin dan 30% pasir sungai. Apabila menggunakan 100% pasir lahar dingin, maka nilai kuat tekan yang didapatkan masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan 100% pasir sungai. Hal ini berbeda jauh, untuk penggunaan *bottom ash* untuk mengganti pasir sungai, kuat tekan beton hanya dapat meningkat pada jumlah 10% *bottom ash*, selebihnya mengalami penurunan kuat tekan beton [5].



Gambar 6. Peningkatan kuat tekan beton – pasir lahar dingin

Pengaruh umur beton pada peningkatan kuat tekan beton untuk masing-masing penggunaan pasir lahar dingin ditunjukkan dalam Gambar 7. Peningkatan signifikan dari umur 7 hari ke 14 hari terlihat jelas pada penggunaan 60-70% pasir lahar dingin. Ini menunjukkan penggunaan pasir lahar dingin efektif pada 60-70% dan pasir sungai 30-40%. Efektifitas penggunaan pasir lahar dingin terlihat mencapai puncak pada penggunaan 60-70%.



Gambar 7. Pengaruh umur beton terhadap kuat tekan

Secara keseluruhan penggunaan pasir lahar dingin menunjukkan kuat tekan beton yang lebih tinggi daripada pasir sungai. Hal berbeda terjadi pada penggunaan di atas 50% *volcanic pyroclastics* untuk mengganti pasir sungai, nilai kuat tekan beton mengalami penurunan dibandingkan penggunaan di bawah 50% *volcanic pyroclastics* [7]. Pasir lahar dingin dapat dijadikan pilihan untuk digunakan sebagai agregat halus pada campuran beton. Material ini cukup berlimpah setiap kali terjadi erupsi gunung berapi. Penggunaan pasir lahar dingin dapat mengurangi dampak lingkungan sekitar gunung berapi dan dapat meningkatkan ekonomi masyarakat sekitar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka diambil beberapa kesimpulan. Penggunaan pasir lahar dingin memberikan peningkatan nilai kuat tekan beton. Peningkatan kuat tekan beton pada umur beton 7 hari didapatkan grafik berbentuk linier seiring dengan penambahan jumlah pasir lahar dingin. Sedangkan pada umur beton 14 hari diperoleh hasil grafik yang berbentuk parabola, dimana nilai kuat tekan beton optimum terdapat pada variasi dengan penambahan jumlah pasir lahar dingin sebanyak 60-70% atau sekitar 1,4 kali lebih tinggi dari nilai kuat tekan beton dengan pasir sungai.

Rekomendasi penggunaan penggunaan pasir lahar dingin sebanyak 70% dan 30% pasir sungai untuk menghasilkan kuat tekan beton maksimum. Penggunaan 100% pasir lahar dingin masih dapat dimungkinkan namun peningkatannya tidak maksimal. Perlu digarisbawahi bahwa umur beton yang digunakan dalam penelitian ini hanya sampai pada 14 hari. Penggunaan pasir lahar dingin perlu penelitian lanjutan pada umur beton di atas 14 hari dengan penggunaan material pasir lahar dingin sebanyak 60-70%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis berterimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini. Demikian juga kepada kepala laboratorium dan asisten Laboratorium Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Medan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Arman, H. Medriosa, A. Americo, and M. Ridwan, "Studi eksperimen pengaruh campuran sika dalam meningkatkan kuat tekan bata ringan," *Rang Tek. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 14–20, 2020.
- [2] A. Arman and A. Oftan, "Studi eskperimental efektifitas penggunaan zat adiktif fosroc SP 337 pada beton," *Rang Tek. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 310–315, 2021.
- [3] A. E. Lianasari and R. P. Siahaan, "Perilaku lentur balok beton bertulang high volume fly ash (HVFA) dengan variasi ukuran butir maksimum agregat," *J. Tek. Sipil*, vol. 15, no. 2, pp. 91–98, 2019.
- [4] M. Qomaruddin, A. R. Nabella, I. Sitohang, and H. A. Lie, "Studi pengaruh air laut pada mortar beton normal dan mortar beton dengan fly ash," *J. Tek. Sipil*, vol. 14, no. 3, pp. 153–160, 2017.
- [5] R. D. Susanti, I. K. Hadi, S. Sitompul, and I. Shubhan, "Effect bottom ash as partial Substitute of sand on compression strength of concrete," *Int. J. Eng. & Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 6084–6087, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.23127.
- [6] K. G. K. Kumar and C. Krishnaveni, "Study on partial replacement of aggregate by pumice stone in cement concrete," *Int. J. Sci. Technoledge*, vol. 4, no. 3, pp. 113–119, 2016.
- [7] G. D. . Okwadha and K. J. Ngengi, "Partial replacement of river sand with volcanic pyroclastics as fine aggregates in concrete production," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 5, pp. 41–45, 2016, doi: 10.9790/1684-1305034145.
- [8] F. Yu, C. Feng, S. Wang, W. Huang, Y. Fang, and S. Bu, "Self-consolidating concrete column," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 27, no. 3, pp. 188–202, 2021.
- [9] Y. R. Alkhaly, C. N. Panondang, and Zulfahmi, "Kuat tekan beton polimer berbahan abu vulkanik Gunung Sinabung dan resin epoksi," *Teras J.*, vol. 5, no. 2, pp. 125–132, 2015.
- [10] R. D. Susanti, R. Tambunan, A. Waruwu, and M. Syamsuddin, "Studies on concrete by partial replacement of cement with volcanic ash," *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 161–165, 2018, doi: 10.5937/jaes16-16494.
- [11] N. Ariyani and D. Luser, "Pengaruh abu vulkanik Gunung Merapi terhadap kuat tekan beton," *Maj. Ilm. UKRIM*, vol. 1, pp. 35–44, 2013.
- [12] S. Sudarmadji and H. Hamdi, "Filler terhadap campuran aspal beton lapis asphalt concrete – wearing course (Ac-Wc)," *PILAR J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 2, pp. 179–188, 2014.
- [13] H. A. Bale, "Analisis pasir lahar dingin dari sungai opak, kuning dan boyong untuk beton dengan pengerjaan konvensional," in *Seminar Nasional-1 BMPPTSSI - KoNTekS 5*, 2011, pp. 91–96.
- [14] E. Desmaliana, Hazairin, B. Herbudiman, and R. Lesmana, "Kajian eksperimental sifat mekanik beton porous dengan variasi faktor air semen," *J. Tek. Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 19–29, 2018.
- [15] Iskandar, D. Tjitradi, and Eliatun, "Nilai slump ideal untuk perencanaan campuran beton mutu 50 MPa," *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 1–10, 2005.
- [16] C. Kurniawan, P. Sebayang, and M. Muljadi, "Pembuatan beton high-strength berbasis mikrosilika dari abu vulkanik Gunung Merapi," *J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. TELAAH*, vol. 29, no. 1, pp. 15–21, 2011.