



Aplikasi *Response Surface Methodology* pada Optimasi Penambahan *Blast Furnace Slag* Terhadap Waktu Pengikatan dan Kuat Tekan Semen

Hardjono Hardjono, Cucuk Evi Lusiani*, Agung Ari Wibowo, Mochammad Agung Indra Iswara

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

*E-mail: lusiani1891@polinema.ac.id

ABSTRAK

Produksi semen setengah jadi (*clinker*) membutuhkan energi yang tinggi sehingga menggunakan batu bara dalam jumlah besar. Hal ini menyebabkan biaya produksi dari pabrik semen juga tinggi. Kebutuhan energi yang besar untuk menghasilkan *clinker* tersebut dapat dikurangi dengan menambahkan *blast furnace slag* sebagai campuran pembuatan semen. Campuran *clinker* dapat menghasilkan produk semen yang memiliki waktu pengikatan dan kuat tekan sesuai SNI. Pengaruh penambahan *blast furnace slag* sebagai campuran *clinker* terhadap waktu pengikatan dan kuat tekan semen dapat dioptimalkan dengan *response surface methodology* (RSM) menggunakan *Central Composite Design* (CCD). Optimasi dengan menggunakan RSM bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum pada penambahan *blast furnace slag* dan *clinker* terhadap variabel respon berupa waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan kuat tekan. Hasil uji ANOVA dan analisis *response surface* menunjukkan bahwa penambahan *blast furnace slag* sebagai campuran dalam pembuatan semen memberikan pengaruh yang signifikan terhadap waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan kuat tekan. Penambahan 5% *blast furnace slag* dengan 92,5% *clinker* pada campuran *clinker* dan *gypsum* merupakan kondisi optimum yang memberikan pengaruh signifikan terhadap variabel respon.

Kata kunci: *Blast furnace slag*, *clinker*, *response surface methodology*.

ABSTRACT

The production of clinker consumes high energy and causes high production cost of cement industry. It can be reduced by adding blast furnace slag as a mixture in cement production. The blast furnace slag - clinker mixture can produce cement with setting time and compressive strength according to SNI. The effect of the addition of blast furnace slag as a clinker mixture to the setting time and compressive strength of cement can be optimized by response surface methodology (RSM) using Central Composite Design (CCD). Optimization by using RSM aims to determine the optimum condition of the blast furnace slag – clinker mixture to the initial setting time, final setting time, and compressive strength. ANOVA test results and response surface analysis show that the addition of blast furnace slag into the cement mixture has a significant influence on the initial setting time, final setting time, and compressive strength. The addition of 5% blast furnace slag with 92.5% clinker in the mixture of clinker and gypsum is the optimum condition which gives a significant effect on the response variable.

Keywords: *Blast furnace slag*, *clinker*, *response surface methodology*.

1. PENDAHULUAN

Tuntutan global untuk mengurangi penggunaan sumber daya alam berlebih menjadikan industri semen harus mengurangi penggunaan bahan bakar batu bara terutama dalam memproduksi semen setengah jadi (*clinker*). *Clinker* dihasilkan dari pemanasan di *kiln* pada suhu operasi

1400°C. Untuk mengurangi kebutuhan energi yang besar dalam pembuatan *clinker*, beberapa material sebagai bahan campuran semen seperti *blast furnace slag* (BFS) dapat ditambahkan [1]. BFS adalah produk dari produksi besi seperti pada PT Krakatau Steel, yang telah diselidiki dan digunakan secara luas, khususnya sebagai bahan

tambahan untuk semen atau bahan yang diaktivasi dengan alkali. BFS ditambahkan sebagai bahan tambahan di *finish mill* untuk selanjutnya dicampur dengan *clinker*.

Penelitian tentang penggunaan BFS sebagai bahan campuran dalam pembuatan semen telah dilakukan sejak 1999. Osborne [2] melakukan penelitian tentang *durability* dari beton *portland* BFS. Penelitian tersebut melaporkan bahwa penambahan BFS dapat mengurangi biaya produksi dan konsumsi energi dalam pembuatan semen dibandingkan dengan semen *portland* normal.

Penelitian lain juga dilakukan oleh Escalante-Garcia, dkk. [3] yang menunjukkan bahwa beton yang dibuat dengan penambahan *activated slag* dapat memberikan efek lingkungan yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan pada semen *portland* dengan penambahan *activated slag* tidak membutuhkan proses termal dan tidak terdapat dekarboksiasi dari CaCO_3 . Selain itu, semen *portland* dengan penambahan *activated slag* dapat lebih tahan terhadap *grinding*, dan ukuran partikel yang lebih kasar dapat mengurangi biaya proses pembuatan semen.

Penelitian tentang penambahan BFS pada pembuatan semen juga dilakukan oleh Samsuri, dkk. [4]. Penelitian tersebut menyatakan bahwa penambahan BFS dapat mengurangi penggunaan *clinker* dengan hasil semen yang tetap memiliki nilai kuat tekan dan waktu pengikatan sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI). BFS memiliki sifat seperti terak yang mengandung oksida besi dan silikat dapat memberikan pengaruh terhadap kuat tekan. Berdasarkan SNI 15-2049-2004, syarat fisika utama untuk semen OPC dalam pengujian kuat tekan adalah umur 3, 7, dan 28 hari [5].

Besarnya pengaruh penambahan BFS pada pembuatan semen dapat dilihat dari lamanya waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan nilai kuat tekan sebagai variabel respon. Hubungan antara variabel proses terhadap variabel respon dapat dianalisis menggunakan *response surface*

methodology (RSM). Umumnya, RSM diawali dengan langkah mengidentifikasi variabel bebas atau faktor yang mempengaruhi proses kemudian dilanjutkan dengan menganalisis pengaruh variabel bebas terhadap variabel respon [6]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi optimal dari penambahan BFS terhadap waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan nilai kuat tekan dari semen yang dihasilkan dengan RSM menggunakan *Central Composite Design* (CCD).

2. METODE PENELITIAN

2.1. Optimasi dengan RSM

Penelitian ini menggunakan rancangan RSM untuk mendapatkan respon waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan kuat tekan yang optimal dari semen yang dibuat setelah hari ke-28. Terdapat empat tahap dalam aplikasi RSM, yaitu: tahap pembuatan rancangan formulasi, tahap formulasi, tahap analisis respon, dan tahap analisis data.

2.2. Tahap pembuatan rancangan formulasi

Rancangan respon dilakukan menggunakan *software Design Expert 11* dengan CCD. Beberapa variabel yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain;

- Variabel tetap: *Feed gypsum* masuk ke *mill* yaitu 2,5 % dari total berat semen; Waktu tinggal di *mill* selama 60 menit; dan Ukuran partikel semua material sebesar 325 Mesh.
- Variabel bebas dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan variabel bebas dan simbol perlakuan pada penelitian.

Variabel bebas	Simbol	Range dan level		
		-1	0	1
<i>Blast furnace slag</i>	A	0	5	10
<i>Clinker</i>	B	87,5	92,5	97,5

- Variabel respon yang dioptimumkan: waktu pengikatan awal (Y_1); waktu

pengikatan akhir (Y_2); dan kuat tekan (Y_3) dari semen yang dihasilkan.

2.3. Tahap Formulasi

Berdasarkan kombinasi perlakuan yang diperoleh pada tahap sebelumnya, maka langkah selanjutnya adalah formulasi atau pembuatan campuran semen. Data hasil percobaan pada penelitian yang dianalisis menggunakan RSM dapat dilihat pada Tabel 2.

2.4. Tahap Analisis Respon

Setiap variabel respon (Y) kemudian dianalisis ANOVA satu persatu. Model ANOVA yang digunakan adalah CCD. Model ANOVA yang terdapat pada *design* ini adalah *Linear*, *Quadratic*, *Special Cubic*, dan *Cubic*. Model yang memberikan signifikansi pada ANOVA dan non signifikansi pada *lack of fit* dipilih untuk menganalisis variabel. Model ANOVA yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *quadratic* seperti pada penjelasan di tahap analisis data.

2.5. Tahap Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan analisis *quadratic model* untuk mendapatkan model optimasi dengan persamaan sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon$$

Keterangan:

Y : variabel respon

X_1, X_2 : variabel bebas

β_0 : parameter konstan

β_1, β_2 : parameter linier

β_{11}, β_{22} : parameter variabel kuadrat

β_{12} : interaksi

ε : random error

Desain eksperimen yang umum digunakan ada dua, yaitu:

1. *Central Composite Design* (CCD)

2. *Box-Behnken Design* (BBD)

Kedua desain tersebut ditentukan dari desain faktorial sederhana atau faktorial pecahan. Desain yang digunakan dalam penelitian ini adalah CCD dengan formula seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 [7].

Tabel 2. Data penambahan *blast furnace slag* dan *clinker* terhadap waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan kuat tekan menggunakan *central composite design* (CCD).

<i>Run</i>	<i>Factor 1</i> A: Penambahan BFS (%)	<i>Factor 2</i> B: <i>Clinker</i> (%)	<i>Response 1</i> Waktu Pengikatan Awal (menit)	<i>Response 2</i> Waktu Pengikatan Akhir (menit)	<i>Response 3</i> Kuat Tekan (kg/cm ²)
1	5	85,4	90,8	222	408
2	-2,07107	92,5	107	255	350
3	5	99,6	90,8	222	408
4	10	87,5	117,5	240	412
5	12,0711	92,5	117,5	240	412
6	0	87,5	107	255	350
7	5	92,5	90,8	222	408
8	5	92,5	90,8	222	408
9	5	92,5	90,8	222	408
10	0	97,5	107	255	350
11	5	92,5	90,8	222	408
12	5	92,5	90,8	222	408
13	10	97,5	117,5	240	412

Tabel 3. Formula untuk *Central Composite Design* (CCD).

Perlakuan	X ₁	X ₂
1	-1.000	-1.000
2	-1.000	1.000
3	1.000	-1.000
4	1.000	1.000
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000
7	0.000	0.000
8	0.000	0.000
9	0.000	0.000
10	1.414	0.000
11	-1.414	0.000
12	0.000	1.414
13	0.000	-1.414

Keterangan: -1 = nilai terendah, 0 = nilai tengah/medium, 1 = nilai tertinggi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

BFS sebagai bahan aditif pada semen *portland* menjadi alternatif yang dipertimbangkan oleh industri semen. Penggunaan bahan ini dapat memberikan penurunan konsumsi bahan baku alami, energi dan khususnya, penurunan emisi gas CO₂ dalam produksi semen [2-3]. Hal ini dikarenakan penambahan BFS dapat mengurangi penggunaan *clinker* sehingga penggilingan *slag* untuk penggantian semen hanya membutuhkan 25% dari energi yang dibutuhkan untuk memproduksi semen *portland* [8].

Pengaruh campuran *blast furnace slag-clinker* terhadap waktu pengikatan dan kuat tekan dari semen yang dihasilkan dapat dievaluasi dengan 13 perlakuan yang dapat dilihat pada Tabel 2. Perlakuan tersebut selanjutnya diuji menggunakan ANOVA untuk mengetahui model persamaan yang menghubungkan variabel bebas terhadap variabel respon. Hasil uji ANOVA dan persamaan kuadrat untuk ketiga variabel respon dapat dilihat pada Tabel 4 dan 5.

Berdasarkan hasil uji ANOVA, model kuadrat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variabel respon (waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir,

dan kuat tekan) dengan nilai $p < 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa model kuadrat dapat digunakan untuk memprediksi kondisi respon optimum akibat pengaruh penambahan *blast furnace slag-clinker* sebagai campuran untuk menghasilkan semen.

Gambar plot pada analisis *response surface* untuk pengaruh penambahan *blast furnace slag - clinker* terhadap variabel respon dapat dilihat pada Gambar 1-3.

Gambar 1 dan 2 menunjukkan bahwa waktu pengikatan awal dan waktu pengikatan akhir optimum terjadi pada penambahan 5% BFS dengan 92,5% *clinker*. Waktu pengikatan awal pada komposisi ini terjadi selama 90,8 menit dengan waktu pengikatan akhir 222 menit. Menurut Hariawan [9], waktu pengikatan awal pada semen *portland* tidak kurang dari 45 menit dengan waktu pengikatan akhir tidak lebih dari 375 menit.

Countour plot dan *response surface* pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa hasil kuat tekan untuk semen yang dibuat setelah hari ke-28 mengalami kondisi optimum pada penambahan 5% BFS dan 92,5% *clinker* dengan nilai sebesar 408 kg/cm². Ini menunjukkan bahwa semen memiliki kuat tekan yang baik saat campuran BFS tidak terlalu tinggi. Dubey, dkk. [10] menyatakan bahwa properti semen dapat dipertahankan sesuai SNI pada penambahan BFS dengan rentang komposisi penambahan 5-30%. Hal yang mempengaruhi kuat tekan semen adalah kandungan SiO₂ dan CaO yang ada di dalam material. Berdasarkan analisis komposisi bahan, BFS mengandung SiO₂ sebesar 34,8% dan CaO sebesar 45,2%. Hariawan [9] melaporkan bahwa kadar C₃S (3CaO.SiO₂) di dalam semen memberikan kontribusi yang besar pada tekanan awal semen sedangkan C₂S (2CaO.SiO₂) memberikan kontribusi pada kekuatan tekan dalam umur yang panjang.

Berdasarkan Gambar 1-3 dapat dilihat bahwa penambahan 5% BFS dengan 92,5% *clinker* merupakan kondisi optimum yang memberikan pengaruh signifikan terhadap waktu pengikatan awal (90,8 menit), waktu

pengikatan akhir (222 menit), dan kuat tekan 28 hari. (408 kg/cm²) pada pembuatan semen setelah

Tabel 4. Hasil uji ANOVA dari pengaruh penambahan *blast furnace slag-clinker* terhadap waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan kuat tekan.

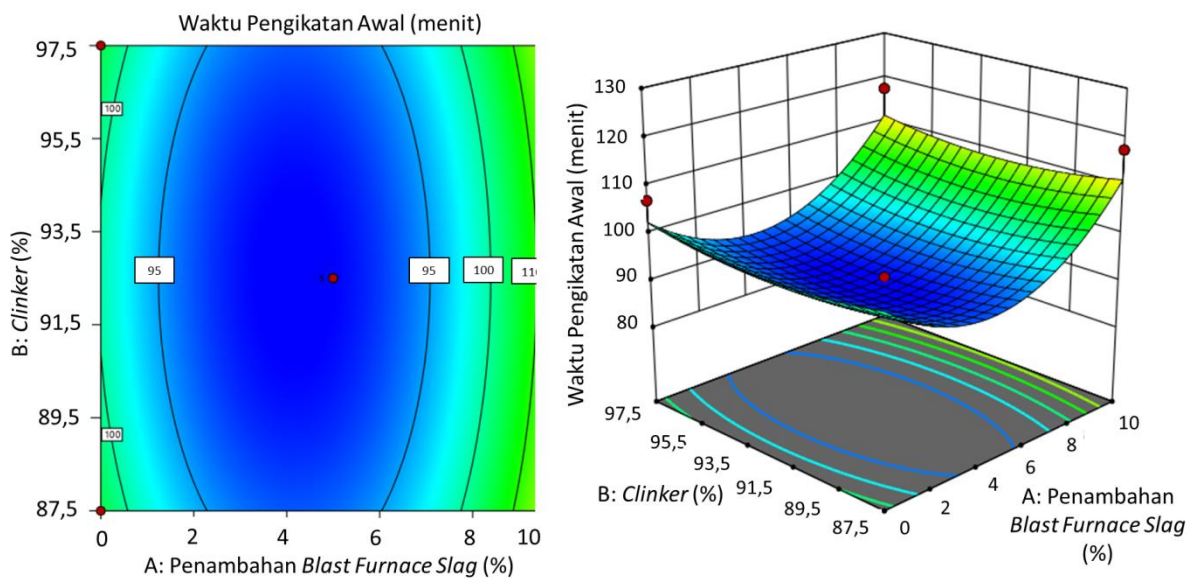
Respon	Model	Mean Square	f-value	p-value	R ²	Keterangan
Waktu pengikatan awal	Quadratic	283,42	8,45	0,007	0,8579	signifikan
Waktu pengikatan akhir	Quadratic	420,71	8,8	0,0063	0,8627	signifikan
Kuat Tekan	Quadratic	1518,37	20,08	0,0005	0,9348	signifikan

Tabel 5. Model persamaan kuadratik hasil uji ANOVA dari waktu pengikatan awal, waktu pengikatan akhir, dan kuat tekan.

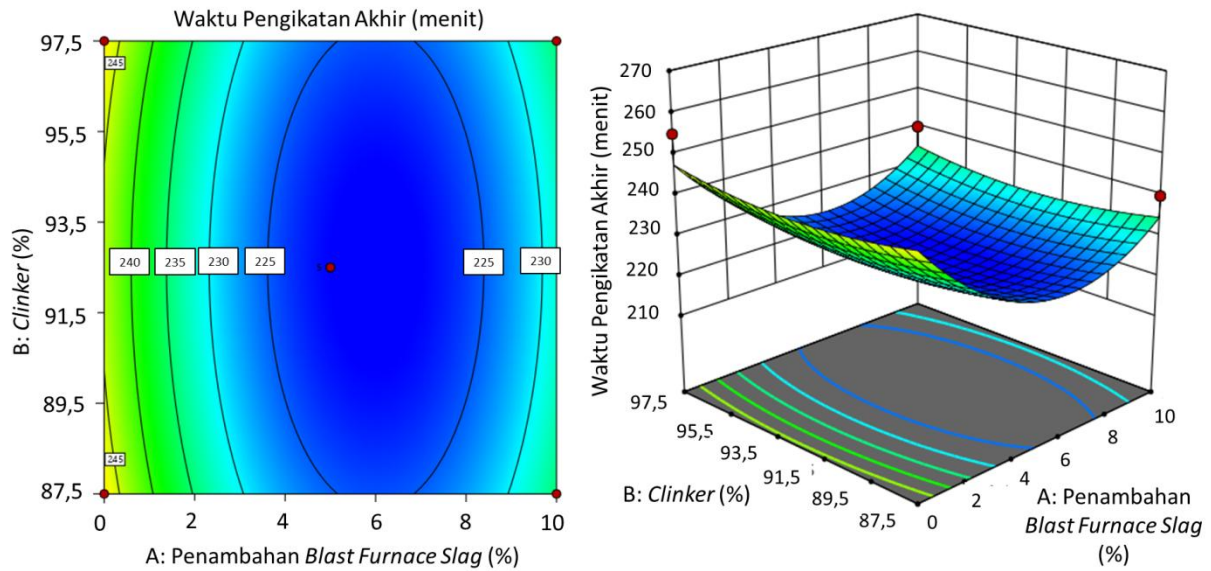
Respon	Persamaan	R ²
Waktu Pengikatan Awal	$Y_1 = 90,8 + 4,48*A - 13,41*A^2 + 2,68*B^2$	0,8579
Waktu Pengikatan Akhir	$Y_2 = 222 - 6,4*A + 15,94*A^2 + 3,19*B^2$	0,8627
Kuat tekan	$Y_3 = 408 + 26,46*A - 16,87*A^2 - 3,37*B^2$	0,9348

Keterangan: A = *blast furnace slag*; B = *clinker*;

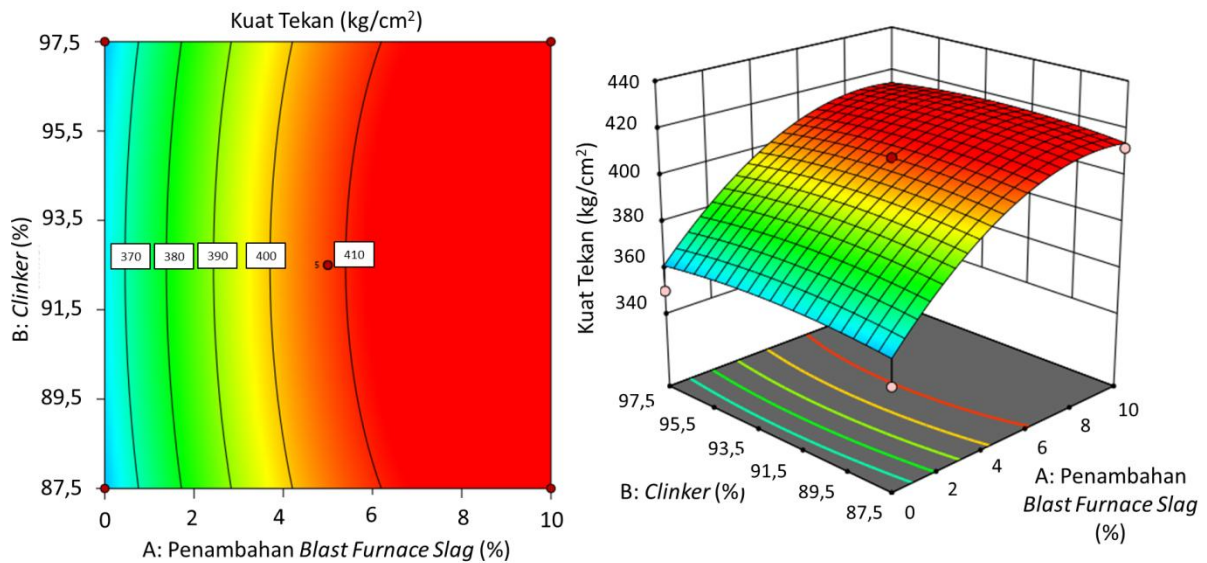
Y₁ = waktu pengikatan awal; Y₂ = waktu pengikatan akhir; Y₃ = kuat tekan



Gambar 1. Contour plot dan response surface dari penambahan *blast furnace slag* dan *clinker* terhadap waktu pengikatan awal.



Gambar 2. Contour plot dan response surface dari penambahan blast furnace slag dan clinker terhadap waktu pengikatan akhir.



Gambar 3. Contour plot dan response surface dari penambahan blast furnace slag dan clinker terhadap kuat tekan.

4. KESIMPULAN

Penambahan BFS sebagai campuran dalam pembuatan semen memberikan pengaruh yang signifikan ($p < 0,05$) baik terhadap waktu pengikatan awal (90,8 menit), waktu pengikatan akhir (222 menit), dan kuat tekan (408 kg/cm^2) pada pembuatan semen setelah 28 hari. Penambahan 5% blast furnace slag dengan 92,5% clinker pada campuran clinker dan gypsum merupakan kondisi optimum yang memberikan pengaruh signifikan terhadap variabel respon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan jurnal ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada Usman Harmuji dan Muhammad Rahmatulloh Shodiqin yang telah membantu mengerjakan penelitian ini dan juga kepada Politeknik Negeri Malang yang telah membantu di bidang finansial untuk terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Alemayehu, O. Sahu, Minimalization of Variation in Clinker Quality, *Advances in Materials*, vol. 2, no. 2, hal. 23-28, 2013.
- [2] G. J. Osborne, Durability of portland blast-furnace slag cement concrete, *Cement and Concrete Composite*, vol. 21, no. 1, hal. 11-21, 1999.
- [3] J. I. Escalante-Garcia, L. J. Espinoza-Perez, A. Gorokhovskiy, L. Y. Gomez-Zamorano, Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement, *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, hal. 2511-2517, 2009.
- [4] S. Samsuri, N. Tjahjono, C. Fatma P., Pengaruh *Granulated Blast Furnace Slag* dalam Semen terhadap Kapasitas Produksi, Kuat Tekan Mortar, dan Nilai Ekonomis, *Widya Teknika*, vol. 24, no. 2, hal. 67-71, 2016.
- [5] SNI 15-2049-2004, *Semen Portland*, Badan Standarisasi Indonesia.
- [6] H. Niawanti, N. P. Putri, N. Rabimardani, S. Amalia, C. E. Lusiani, Modelling of Tannin Mass Transfer on the *Averrhoa Bilimbi* Leaf Extraction using Box-Behnken Design, *Eurasian Journal of Biosciences*, vol. 13, no. 2, hal. 2327-2335, 2019.
- [7] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Third Edition. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- [8] A. Ehrenberg, CO₂ Emissions and Energy Consumption of Granulated Blast Furnace Slag, in: EUROSLAG (3rd European Slag Conference), Keyworth, UK, hal. 151-166, 2002.
- [9] J. B. Hariawan, Pengaruh Perbedaan Karakteristik Tipe Semen Ordinary Portland Cement (OPC) dan Portland Composite Cement (PCC) terhadap Kuat Tekan Mortar dan Setting Time, Universitas Gunadarma, 2007.
- [10] A. Dubey, R. Chandak, R. K. Yadav, Effect of Blast Furnace Slag Powder on Compressive Strength of Concrete, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 3, no. 8, hal. 1-5, 2012.