

**KAJIAN EMISI KARBON *FLY ASH* DAN *STEEL SLAG* SEBAGAI PENGGANTI SEMEN
PADA CAMPURAN BETON MENGGUNAKAN METODE *ARTIFICIAL NEURAL
NETWORK*****Salma Fauziyyah¹, Ilham², Siswanti Zuraida³**Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Desain, Institut Teknologi Sains Bandung, Cikarang Pusat,
IndonesiaE-mail: salmafauz23@gmail.com**Abstrak**

Beton merupakan material konstruksi yang terbuat dari campuran semen Portland, air, agregat kasar, agregat halus, dan terkadang juga menggunakan bahan admixture lainnya dengan perbandingan tertentu. Semen yang merupakan bahan pengikat pada campuran beton ternyata berkontribusi terhadap 8% dari emisi karbon dioksida (CO₂) dunia. Fly ash dan steel slag merupakan salah satu limbah yang saat ini sedang diteliti dan dikembangkan sebagai bahan pengganti semen pada campuran beton. Hal ini dikarenakan komposisi kimia pada fly ash dan slag yang menyerupai semen, sangat cocok jika ditambahkan pada campuran beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil prediksi kadar optimum fly ash dan slag pada campuran beton ditinjau dari sisi kekuatannya dengan menggunakan metode Artificial neural network (ANN) dan sesuai dengan SNI 7656:2012. Selain itu penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui perbandingan besarnya emisi CO₂ yang dihasilkan dari beton normal, beton dengan fly ash, dan beton dengan steel slag, dengan menggunakan referensi dari Idemat2014 dan Ecoinvent V3. Hasil penelitian menunjukkan besarnya kadar optimum fly ash kelas F, fly ash kelas C, dan steel slag pada campuran beton berturut-turut adalah 30%, 20%, dan 55%. Hasil penelitian juga menyimpulkan beton steel slag sebagai penghasil emisi CO₂ terendah dibanding beton normal, beton fly ash kelas F, dan beton fly ash kelas C.

Kata Kunci: Beton, Fly ash, Steel slag, ANN, Kuat Tekan, Emisi CO₂**Abstract**

Concrete is a construction material made from a mixture of Portland cement, air, coarse aggregate, fine aggregate, and sometimes also uses admixture materials with a certain ratio. Cement, which is the binding agent in the concrete mixture, contributes to 8% of the world's carbon dioxide (CO₂) emissions. Fly ash and steel slag are one of the wastes that are currently being researched and developed as cement ingredients in concrete mixtures. This is because the chemical composition of fly ash and slag associated with cement is very suitable when added to concrete mixtures. This study aims to find out of the optimal of fly ash and slag content in the concrete mixture in terms of strength by using the Artificial neural network (ANN) method and in accordance with SNI 7656: 2012. Furthermore, this study also aims to measure the ratio of CO₂ emissions that are produced from normal concrete, concrete with fly ash, and concrete with steel slag, using references from Idemat2014 and Ecoinvent V3. The results showed that the optimum content of fly ash class F, fly ash class C, and steel slag in the concrete mixture were 30%, 20%, and 55%, respectively. The results also concluded that steel concrete slag as the lowest emitter of CO₂ compared to normal concrete, class F fly ash concrete, and class C fly ash concrete.

Keywords: concrete, fly ash, steel slag, ANN, compresive strength, CO₂ emission**1. PENDAHULUAN**

Beton merupakan material yang banyak digunakan sebagai material bangunan di seluruh dunia. Beton dibuat dari campuran semen

Portland, air, dan agregat dan terkadang juga menggunakan bahan *admixture* lainnya dengan perbandingan tertentu. Semen yang digunakan sebagai pengikat pada campuran beton ternyata

menyumbang 8% dari emisi karbon dioksida (CO₂) dunia [1]. Pada proses produksi semen, karbon dioksida (CO₂) berasal dari dua sumber utama, yaitu pembakaran bahan bakar fosil dan reaksi kimia. Batu bara digunakan dalam proses pemanasan *raw meal*, yaitu campuran batu kapur sebagai material utama semen beserta pasir besi dan silika, dalam kiln pada temperatur sangat tinggi dan menghasilkan terak (*klinker*). Dalam proses ini, batu kapur mengalami kalsinasi untuk menghasilkan kalsium oksida (CaO) yang berperan dalam proses hidrasi semen dan melepaskan karbon dioksida (CO₂) ke udara. Penambahan zat aditif yang bersifat *cementitious* dalam campuran beton seperti *fly ash* dan *slag* merupakan suatu teknologi yang saat ini sedang diteliti dan dikembangkan. Tambahan-tambahan baru pada campuran beton ini memperkenalkan variabel baru pada pemodelan kekuatan tekan beton yang berakibat pada bertambahnya tingkat kerumitan. Akhir-akhir ini, metode *artificial intelligence* (AI) salah satunya *Artificial neural network* (ANN) semakin banyak dipakai dalam penyelesaian problem klasifikasi dan regresi karena terbukti lebih akurat daripada metode konvensional. Penelitian ini menggunakan teknik AI untuk memprediksi secara akurat kekuatan tekan beton dari berbagai macam komponen. Neural network memiliki kemampuan untuk mendeteksi hubungan kompleks yang bersifat nonlinear antara faktor prediksi dan hasil prediksi. Data eksperimen diambil dari beberapa penelitian penggunaan material *fly ash* dan *slag* sebagai bahan substitusi semen pada campuran beton yang telah dilakukan di beberapa negara yang ditinjau dari sisi kekuatannya. Dengan menggunakan metode ini, maka akan dapat diprediksi bagaimana kadar optimum *fly ash* dan *slag* pada campuran beton sesuai dengan acuan SNI 7656:2012. Selain meninjau dari sisi kekuatannya, penelitian ini juga akan mengkaji *fly ash* dan *slag* sebagai bahan substitusi semen ditinjau dari sisi lingkungan, yaitu menghitung emisi karbon yang dikeluarkan oleh beton dengan campuran kedua material tersebut. Perhitungan emisi karbon pada penelitian ini menggunakan *database inventory analysis* dengan referensi dari Idemat2014 dan Ecoinvent V3, yang tertuang

dalam database Eco-costs 2012 V2 mengacu pada metode Life Cycle Analysis (LCA).

2. METODE PENELITIAN

Pengembangan model untuk memprediksi kuat tekan beton usia 28 hari menggunakan metode *Artificial neural network* (ANN) berupa dalam bentuk file excel dan didesain oleh Andrew Coffman, yang merupakan bagian penelitian yang dipimpin oleh Dr. Serhan Guner yang merupakan seorang asisten profesor di Departemen Teknik Sipil, University of Toledo.

a. Variabel Penelitian

Sebelum pembuatan model, penulis menentukan parameter-parameter yang terkait. Parameter yang terkait meliputi variabel yang akan menjadi input dan target, serta peneliti juga menentukan parameter yang akan mendukung perancangan model. Populasi sasaran yang digunakan pada penelitian ini adalah jurnal penelitian yang membahas mengenai beton *fly ash* kelas F, beton *fly ash* kelas C, dan beton *slag* yang tersedia di website sciencedirect.com dan situs jurnal lainnya. Setelah itu peneliti mengambil data *mix design* dan hasil kuat tekan beton usia 28 hari yang menggunakan campuran *fly ash* dan *slag* sebagai material *cementitious* dalam jurnal tersebut. Pada penelitian ini, himpunan sampel data yang digunakan adalah data dengan 6 jenis material beton yaitu *fly ash/slag*, semen, pasir, kerikil, air, dan aditif. Dimana variabel dan definisi operasional variabel yang digunakan antara lain :

Tabel 1. Variabel Penelitian

Variabel	Nama	Satuan
Y	Kuat Tekan	MPa
X1	Material <i>Cementitious</i>	Kg/m ³
X2	Semen	Kg/m ³
X3	Pasir	Kg/m ³
X4	Kerikil	Kg/m ³
X5	Air	Kg/m ³
X6	<i>Admixture</i>	Kg/m ³

b. Jaringan Artificial Neural Network Dengan Algoritma Backpropagation

Membangun jaringan *feedforward neural network* dengan algoritma *backpropagation* memerlukan beberapa langkah. Peneliti membagi langkah-langkah tersebut ke dalam beberapa tahap yaitu sebagai berikut :

1) Menentukan Input

Data yang akan diinput pada jaringan *feedforward neural network* dengan algoritma *backpropagation* adalah berupa variabel yang tercantum pada Tabel 1. Jumlah input dari masing-masing material *cementitious* adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Keterangan Jumlah Input Data

Keterangan	Fly ash F	Fly ash C	Steel Slag
Jumlah Variabel Input	7	7	7
Jumlah Data	48	19	27
Jumlah Variabel Output	1	1	1

Keterangan :

- a. Variabel Input : X1, X2, X3, X4, X5, X6, Y
- b. Data diperoleh dari jurnal-jurnal pilihan
- c. Variabel Output : Y

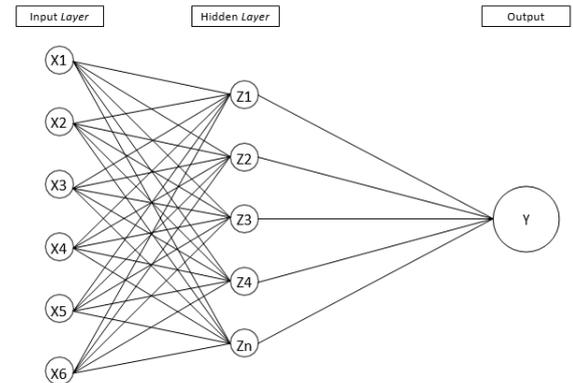
2) Pembagian Data

Data yang ada dibagi menjadi 2 yaitu data *training* dan data *testing*. Beberapa komposisi data *training* dan *testing* yang sering digunakan adalah 80% untuk *training* dan 20% untuk data *testing*; 75% untuk data *training* dan 25% untuk data *testing*; atau 50% data *training* dan 50% untuk data *testing*. Komposisi ini bersifat bebas (Kusumadewi, 2014). Pada penelitian ini menggunakan komposisi 80% untuk data *training* dan 20% untuk data *testing*.

3) Perancangan Model Artificial Neural Network (ANN)

Untuk perancangan model ANN yang akan dibuat oleh peneliti didasari pada arsitektur ANN. ANN mempunyai arsitektur yang terdiri dari jumlah *layer* dan jumlah neuron pada tiap *layer*. Adapun untuk kasus *backpropagation* menggunakan multi *layer* yang terdiri dari input, *hidden*, dan *output*. Berdasarkan rujukan [2], bahwa dengan jumlah 1 *hidden layer* saja cukup memadai untuk menghasilkan *output* yang sesuai target. Sehingga arsitektur jaringan yang dirancang untuk penelitian ini adalah 3 *layer* (*input, hidden, dan output*) dengan neuron untuk *input layer* berjumlah 6 neuron, untuk *hidden layer* berjumlah 1 – 6 neuron, dan untuk *output*

layer berjumlah 1 neuron. Gambar 1 berikut adalah rancangan arsitektur yang akan dibentuk.



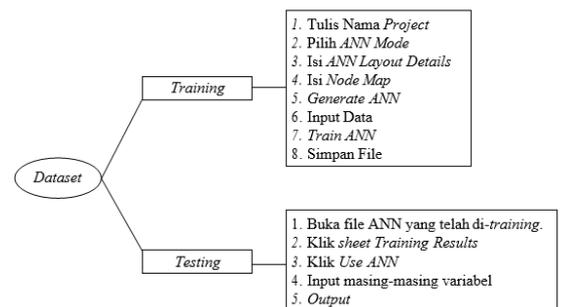
Gambar 1. Rancangan Model Jaringan ANN (Sumber : Ilustrasi Penulis)

Dalam proses perancangan model ANN ini juga dibutuhkan parameter yang mendukung pemodelan. Parameter tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Parameter Perancangan Model ANN

Parameter	Keterangan	Sumber Data	Training Speed	Iterasi
Input Layer	6 Variabel X 1 Variabel Y	Hasil Penelitian Jurnal Terpilih	0.5	7000
Hidden Layer	1 – 6 Neuron	-		
Output Layer	1 Variabel Y	Hasil Penelitian Jurnal Terpilih		

Berikut ini adalah tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melakukan pemodelan jaringan menggunakan ANN :



Gambar 2. Tahapan Pemodelan A (Sumber : Ilustrasi Penulis)

c. Rancangan Komposisi Campuran Beton (Mix Design) Beton

Rancangan campuran beton menggunakan acuan SNI 7656:2012 tentang “Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa”. Parameter rancangan campuran beton yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 4. Parameter *Mix Design* Beton

No.	Parameter	Data	
1.	Kuat tekan rencana, f_c (MPa)	40	
2.	Tipe semen	Semen Portland, tipe I tanpa tambahan udara	
3.	Ukuran maksimum nominal agregat kasar (mm)	37,5 mm	
4.	Jenis agregat halus	Pasir sungai	
5.	Jenis agregat kasar	Batu pecah	
6.	Berat jenis	Semen	3,15
		Pasir (SSD)	2,64
		Kerikil (SSD)	2,681
7.	Berat volume	Kerikil 1500 kg/m ³	
8.	Modulus halus butir	Pasir 2,80	
9.	Absorpsi	Pasir	0,70
		Kerikil	0,50
10.	<i>Slump</i> rencana	150 – 175 mm	
11.	Bahan tambah kimia	Tidak ada	

Selanjutnya hasil rancangan campuran beton akan digunakan *fly ash* dan atau *steel slag* sebagai bahan pengganti semen sebesar 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, dan 55% terhadap berat semen. Hasil perhitungan rancangan campuran beton ditunjukkan dalam Tabel 5 dan Tabel 6 berikut.

Tabel 5. *Mix Design* Beton Mutu 40 Mpa

Semen (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Kerikil (kg/m ³)	Air (kg/m ³)
452.38	702.62	1065	190

Tabel 6. Proporsi Campuran Beton dengan Campuran *Fly ash* atau *Steel Slag*

Material	Persentase Penggantian <i>Fly ash</i> atau <i>Steel slag</i>							
	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%
<i>Fly ash/Steel slag</i> (kg/m ³)	90.476	113.095	135.714	158.333	180.952	203.571	226.19	248.809
Semen (kg/m ³)	361.904	339.285	316.666	294.047	271.428	248.809	226.19	203.571
Pasir (kg/m ³)	702.62	702.62	702.62	702.62	702.62	702.62	702.62	702.62
Kerikil (kg/m ³)	1065	1065	1065	1065	1065	1065	1065	1065
Air (kg/m ³)	190	190	190	190	190	190	190	190
Admixture (kg/m ³)	0	0	0	0	0	0	0	0

d. Perhitungan Emisi Karbon Beton

Perhitungan emisi karbon dengan menggunakan *database inventory analysis* yang mengacu pada metode *Life Cycle Assessment (LCA)* dan menggunakan referensi dari Idemat 2014 dan Ecoinvent V3, yang tertuang dalam *database Eco-costs 2012 V2*. Dalam *inventory analysis*, disediakan input data yang akan dianalisis, aliran material dari produk yang ditinjau, dan *output* hasil akhir yang menjadi kajian evaluasi. Alur pekerjaan tahap 2 ini dijelaskan pada Gambar 3.

Gambar 3. Perhitungan Emisi Karbon (Sumber : Zuraida, 2014)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam proses *training* telah dilakukan pembentukan model ANN dengan cara percobaan perubahan terhadap jumlah neuron.

Maka dengan percobaan tersebut didapatkan beberapa model ANN, dimana akurasi model didapat dari perhitungan tingkat kesalahan yaitu dengan menghitung nilai MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) yang didapat dengan perbandingan antara hasil prediksi dengan data aktual.

a. Hasil Training ANN

Tabel 7 berikut ini menunjukkan hasil berupa nilai MAPE dengan jumlah neuron *hidden layer* yang diperoleh dalam proses pelatihan dengan menggunakan data nilai kuat tekan beton dengan *fly ash* kelas F, beton dengan *fly ash* kelas C, dan beton dengan *steel slag* usia 28 hari. Dimana dengan percobaan beberapa neuron ini didapatkan model ANN dengan nilai MAPE terkecil.

Tabel 7. Hasil *Training ANN*

Jumlah Neuron Hidden Layer	Model ANN	Nilai MAPE		
		<i>Fly ash</i> Kelas F	<i>Fly ash</i> Kelas C	<i>Steel Slag</i>
1	6-1-1	7.45 %	3.37 %	11.56 %
2	6-2-1	7.44%	3.13 %	11.57 %
3	6-3-1	7.52%	2.9 %	11.59 %
4	6-4-1	7.61%	3.07 %	11.62 %
5	6-5-1	7.75%	3.3 %	11.63 %
6	6-6-1	7.89%	3.48 %	11.63 %

Dari hasil pada Tabel 7 ini didapatkan nilai MAPE dari masing-masing jenis beton yang paling baik berturut-turut yaitu sebesar 7.44%, 2.9%, dan 11.56%. Dimana nilai MAPE dikatakan sangat baik jika nilai eror yang dihasilkan kurang dari 10%, nilai MAPE dikatakan baik jika nilai MAPE yang dihasilkan antara 10% - 25%, sedangkan nilai MAPE dikatakan kurang baik jika nilai MAPE yang dihasilkan lebih dari 25% [3].

b. Hasil Prediksi Kuat Tekan Beton

Berikut ini adalah tabel hasil dari prediksi untuk nilai kuat tekan beton usia 28 hari dengan campuran *fly ash* kelas F, *fly ash* kelas C, dan *steel slag*, sebagai bahan substitusi semen, yang diperoleh dari proses *testing* dengan



menggunakan masing-masing struktur jaringan ANN dengan nilai MAPE terkecil.

Tabel 8. Hasil Prediksi Kuat Tekan Beton *Fly ash* Kelas F Usia 28 Hari

Material	Persentase Penggantian <i>Fly ash</i> atau <i>Slag</i>							
	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%
<i>Fly ash</i> Kelas F (Mpa)	35.57	35.57	35.57	35.56	35.56	35.55	35.55	35.54
<i>Fly ash</i> Kelas C (Mpa)	38.8	38.77	38.75	38.72	38.69	38.67	38.64	38.61
Steel <i>Slag</i> (Mpa)	45.79	46.14	46.59	46.98	47.49	48.06	48.70	49.41

Tabel 8 menunjukkan bahwa semakin besar persentase penggantian *fly ash* kelas F maupun kelas C terhadap berat semen, maka semakin turun kuat tekannya. Hal tersebut juga menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash* untuk mengurangi pencemaran lingkungan hanya bisa digunakan dengan persentase 30% untuk kelas F dan 20% untuk kelas C, namun hal tersebut belum juga mampu mencapai kuat tekan rencana, dengan catatan campuran beton tidak menggunakan bahan tambahan kimia seperti *admixture* maupun aktivator seperti *plasticizer* dan NaOH dengan nilai MAPE struktur jaringan ANN sebesar 7.44%.

Penggunaan *fly ash* yang terlalu banyak akan mengakibatkan mutu beton tersebut menjadi turun karena daya rekat akan berkurang. Hal ini sesuai dengan rujukan [4] dengan judul “*Performance characteristics of high- volume Class F fly ash concrete*”. Hasil dari penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan kuat tekan pada beton seiring meningkatnya presentase *fly ash* pada beton. Penelitian tersebut menggunakan bahan tambahan berupa *superplasticizer*. Penurunan kuat tekan beton ini dikarenakan *fly ash* tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen, namun dengan kandungan air dan ukurannya yang halus, silika oksida (SiO_2) yang terkandung pada *fly ash* akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida (CaO) yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat [5].

Rujukan [6] menunjukkan hasil sebaliknya dari rujukan [4]. Kuat tekan beton usia 28 hari meningkat seiring besarnya persentase penggunaan *fly ash* dalam campuran beton namun berhenti di persentase 50%. Setelah 50% persentase penggantian *fly ash*, kuat beton mulai menurun lagi seiring pertambahan *fly ash* namun

masih di atas kuat tekan beton normal tanpa *fly ash*. Salah satu faktor yang membuat peningkatan kuat tekan dengan persentase *fly ash* yang besar pada beton adalah aktivator. Rujukan [4] menggunakan aktivator berupa larutan NaOH dan LSS (*Liquefied Stabilized Soil*) dalam campuran beton. Komposisi penggunaan aktivator ini juga meningkat seiring besarnya persentase penggunaan *fly ash*. Aktivator ini berfungsi untuk membantu proses hidrasi semen dan mendapatkan kuat beton optimal.

Beton *fly ash* kelas F dan beton *fly ash* kelas C sama-sama belum mampu mencapai kuat tekan rencana, tetapi kuat tekan yang dihasilkan oleh beton *fly ash* kelas C lebih tinggi dari beton *fly ash* kelas F. Jika dilihat dari komposisi kimianya, kandungan kimia *fly ash* kelas C lebih mirip semen dibandingkan dengan *fly ash* kelas F. Seperti kandungan CaO (Kalium Oksida) yang mempunyai peran bereaksi dengan SiO_2 semen pada *fly ash* kelas C lebih besar dibanding dengan kandungan CaO pada *fly ash* kelas F.

Lain halnya dengan *fly ash*, Tabel 4.5 menunjukkan bahwa semakin besar persentase penggantian *steel slag* terhadap berat semen, maka semakin naik kuat tekannya. Hal ini sesuai dengan rujukan [7], hasil penelitian tersebut menyebutkan bahwa dengan penambahan *steel slag* besi lebih dari 25% terhadap berat semen sangat efektif dalam peningkatan mutu beton dibandingkan tanpa menggunakan *steel slag* besi pada umur beton 28 hari. Penelitian ini menggunakan nilai fas (faktor air semen) paling tinggi sebesar 0.27. Selain rujukan tersebut, hasil rujukan [8] menyatakan bahwa ada pada nilai fas 0.5, kuat tekan akhir beton dengan persentase *steel slag* lebih dari 30% terhadap semen secara signifikan lebih rendah dari pada beton normal tanpa *steel slag*. Tetapi pada nilai fas rendah (0.35), kekuatan tekan beton dengan persentase volume *steel slag* tinggi lebih dekat dengan beton normal tanpa *steel slag*. Berdasarkan uraian tersebut, dapat dikatakan bahwa efek negatif *steel slag* terhadap kekuatan beton menurun terletak pada faktor air semen.

c. Emisi Karbon Beton

Hasil emisi karbon beton dihitung berdasarkan kadar optimum masing masing jenis material

cementitious yang diperoleh dari hasil prediksi kuat tekan menggunakan ANN dengan perhitungan emisi karbon menggunakan referensi dari Idemat 2014 dan Ecoinvent V3, yang tertuang dalam database Eco-costs 2012 V2.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Emisi Karbon Beton

Jenis Beton	Kadar Semen	Emisi CO ₂ per m ³ beton (Kg CO ₂ eqv)
Beton Normal	100%	442.1386788
Beton <i>Fly ash</i> Kelas F	70%	330.3883533
Beton <i>Fly ash</i> Kelas C	80%	330.3883533
Beton <i>Steel Slag</i>	45%	223.9263298

Emisi karbon terbesar pada penelitian ini dihasilkan oleh beton normal yaitu 442.1386788 kg CO₂ eqv per m³ beton. Hal ini dikarenakan menurut spesifikasi, semen portland mengeluarkan 0.94 kg CO₂/kg semen, sehingga jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan oleh beton normal tergolong tinggi. Dengan tingginya konsumsi semen, maka semakin meningkat pula produksi gas CO₂. Produksi semen sendiri memberikan banyak dampak terhadap lingkungan, salah satunya adalah menimbulkan efek gas rumah kaca. Gas rumah kaca terbentuk karena adanya peningkatan konsentrasi gas CO₂ dan gas-gas lainnya di atmosfer. Alaminya, jika produksi gas CO₂ pada batas yang wajar tidak menimbulkan bahaya karena CO₂ dibutuhkan untuk membantu tumbuhan hijau melakukan fotosintesis. Namun jika produksi gas CO₂ meningkat secara berlebihan melebihi kemampuan tumbuhan untuk menyerapnya justru akan membahayakan lingkungan. 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 [9].

Beton *steel slag* sebagai penghasil emisi karbon paling rendah dari seluruh jenis beton pada penelitian ini. Emisi karbon yang rendah ini disebabkan oleh nilai CO₂ per kilogram *steel slag* yaitu 0.07 jauh lebih rendah dibanding semen dengan kandungan *fly ash* yaitu 0.5. Selain itu, kemampuan *steel slag* menggantikan kebutuhan semen mencapai 55% terhadap berat semen. Berdasarkan uraian tersebut, beton *steel slag* dengan persentase 55% mampu menekan emisi karbon sebanyak 49% dibanding beton normal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dalam penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan yang dideskripsikan dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Jenis Beton	Kadar Semen	Kuat Tekan (Mpa)	Emisi CO ₂ per m ³ beton (Kg CO ₂ eqv)
Beton Normal	100%	40	442.1386788
Beton <i>Fly ash</i> Kelas F	70%	35.57	330.3883533
Beton <i>Fly ash</i> Kelas C	80%	38.8	330.3883533
Beton <i>Steel Slag</i>	45%	49.4121	223.9263298

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chatham House. (2018). *Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Cambridge: Latimer Trend.
- [2] Fausett, L. (1994). *Fundamentals of Neural Networks: Achitectures, Algorithms, and Applications*. New Jersey: Prentice Hall.
- [3] Amalina, N. (2016). *Penerapan Metode Artificial Neural Network Untuk Meramalkan Nilai Ekspor Migas Dan Non Migas Di Indonesia*. Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 487-493.
- [5] Oscar, et al. (2009). "Sustainability in the Construction Industry: A Review of Recent Developments Basen on LCA". *Construction and Building Materials*, 23
- [6] Shehab, H. K., Eisa, A. S., & Wahba, A. M. (2016). Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and building materials*, 126, 560-565.

- [7] Wahono, A., Nugroho, A. A., & Sugiharto, H. (2015). Pengaruh Penambahan Slag Besi Terhadap Kekuatan Tekan Dan Flowability Pada Self Compacting Concrete. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 4(1).
- [8] Wang, Q., Yan, P., Yang, J., & Zhang, B. (2013). Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1414- 1420.
- [9] Sapulete, C. A., Lie, H. A., & Priastiwi, Y. A. Sustainability Beton Metode Life Cycle Assessment Studi Kasus: Limbah Beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Departemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 24(2), 140-147.