



KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA
Nomor: 9041-KR/UNTAR/V/2023
TENTANG
PENETAPAN DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA
(PROMOSI) PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL

REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA,

- Menimbang : a. bahwa salah satu persyaratan untuk menyelesaikan program doktor adalah mahasiswa wajib menempuh ujian disertasi terbuka (promosi)
- b. bahwa berdasarkan surat Dekan Fakultas Teknik Nomor 452-D/2024/FT-UNTAR/V/2023 tentang Permohonan Penerbitan SKR dan hasil rapat Komite Evaluasi Kelulusan Doktor tanggal 26 Mei 2023, saudara : Agustinus Agus Setiawan/328201012, Endah Murtiana Sari/328192008, dan Heru Bayuaji Sanggoro/328201007 telah memenuhi persyaratan akademik dan non akademik untuk menempuh ujian disertasi terbuka (promosi);
- c. bahwa berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud dalam huruf a dan huruf b perlu ditetapkan Keputusan Rektor tentang Penetapan Dewan Penguji Ujian Disertasi Terbuka (Promosi) Program Doktor Ilmu Teknik Sipil;
- Mengingat : 1. Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 158, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5336);
2. Peraturan Menteri Pendidikan Dan Kebudayaan Nomor 3 tahun 2020 tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi;
3. Peraturan Yayasan Tarumanagara Nomor 2016/X/006-PR/YT tentang Statuta Universitas Tarumanagara;
4. Peraturan Universitas Tarumanagara Nomor 067 tentang Penyelenggaraan Pembelajaran;

MEMUTUSKAN:

- Menetapkan : **KEPUTUSAN REKTOR TENTANG PENETAPAN DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA (PROMOSI) PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL.**
- Kesatu : Menetapkan Dewan Penguji Ujian Disertasi Terbuka (Promosi) Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, yang terdiri atas nama-nama sebagaimana disebutkan pada lampiran Keputusan Rektor ini.



- Kedua : Menugaskan Dewan Penguji Disertasi sebagaimana dimaksud pada Diktum Kesatu untuk:
- a. Melaksanakan ujian disertasi terbuka (promosi) bagi kandidat doktor atas nama mahasiswa sebagaimana disebutkan pada lampiran Keputusan Rektor ini, sesuai dengan tata cara yang berlaku di Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara.
 - b. Melaporkan hasil ujian disertasi terbuka (promosi) kepada Rektor setelah ujian disertasi terbuka (promosi) selesai dilaksanakan.
- Ketiga : Keputusan ini berlaku sejak tanggal ditetapkan

Ditetapkan di Jakarta
Pada tanggal, 29 Mei 2023

REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA



AGUSTINUS PURNA IRAWAN



Lampiran

**KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA
NOMOR: 9041-KR/UNTAR/V/2023
TENTANG PENETAPAN DEWAN PENGUJI UJIAN
DISERTASI TERBUKA (PROMOSI) PROGRAM DOKTOR
ILMU TEKNIK SIPIL**

**DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA (PROMOSI)
PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL**

Hari / Tanggal : Selasa, 30 Mei 2023

Waktu ujian : 08.30- 10.30 WIB

NO	NAMA MHS/NIM	JUDUL DISERTASI	DEWAN PENGUJI
1.	Agustinus Agus Setiawan/328201012	Model Campuran Beton Geopolimer Dengan Menggunakan Metode Deep Learning	1. Prof. Dr. Ir. Agustinus Purna Irawan, MT.,MM.,IPU., A.E. Ketua Sidang/Penguji Internal 2. Prof. Ir. Roesdiman Soegiarso, M.Sc., Ph.D. Anggota/Promotor Utama 3. Prof. Dr.-Ing. Harianto Hardjasaputra Anggota/Promotor Pendamping 4. Dr. Ir. Najid, MT. Anggota/Penguji Internal 5. Lina, ST., M.Kom., Ph.D. Anggota/Penguji Internal 6. Ir. Joko Harsono Widjaja, M.Eng., Ph.D. Anggota/Penguji Eksternal

Ditetapkan di Jakarta

Pada tanggal, 29 Mei 2023

REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA

AGUSTINUS PURNA IRAWAN



Lampiran

**KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA
NOMOR: 9041-KR/UNTAR/V/2023
TENTANG PENETAPAN DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA (PROMOSI)
PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL**

**DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA (PROMOSI)
PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL**

Hari / Tanggal : Selasa, 30 Mei 2023

Waktu ujian : 11.00- 13.00 WIB

NO	NAMA MHS/NIM	JUDUL DISERTASI	DEWAN PENGUJI
1.	Endah Murtiana Sari /328192008	Model Partnering dalam Penyelenggaraan Konstruksi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prof. Dr. Ir. Agustinus Purna Irawan, MT.,MM.,IPU., A.E Ketua Sidang/Promotor Utama 2. Prof. Ir. M. Agung Wibowo, MM, M.Sc. , Ph.D. Anggota/Promotor Pendamping 3. Dr. Ir. Najid, MT. Anggota/Penguji Internal 4. Prof. Ir. Rizal Z. Tamin, DEA., CES., Ph.D. Anggota/Penguji Internal 5. Ir. Muhamad Abduh, MT., Ph.D. Anggota/Penguji Eksternal

Ditetapkan di Jakarta
Pada tanggal, 29 Mei 2023

REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA



AGUSTINUS PURNA IRAWAN



Lampiran

KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA
NOMOR: 9041-KR/UNTAR/V/2023
TENTANG PENETAPAN DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA (PROMOSI)
PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL

DEWAN PENGUJI UJIAN DISERTASI TERBUKA (PROMOSI)
PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL

Hari / Tanggal : Selasa, 30 Mei 2023

Waktu ujian : 14.00- 16.00 WIB

NO	NAMA MHS/NIM	JUDUL DISERTASI	DEWAN PENGUJI
1.	Heru Bayuaji Sanggoro/328201007	Model Prediksi Dampak Konflik Sosial Proyek dengan Pendekatan Kerangka Pengelolaan Lingkungan dan Sosial pada Proyek Infrastruktur	1. Prof. Dr. Ir. Agustinus Purna Irawan, MT.,MM.,IPU., A.E. Ketua Sidang/Penguji Internal 2. Prof. Ir. Sofia W. Alisjahbana, M.Sc., Ph.D. Anggota/Promotor Utama 3. Ir. Dadang M. Ma'some, MSCE., Ph.D. Anggota/Promotor Pendamping 4. Dr. Ir. Najid, MT. Anggota/Penguji Internal 5. Dr. Ir. Onnyxiforus Gondokusumo, M.Eng. Anggota/Penguji Internal 6. Prof. Ir. Rizal Z. Tamin, DEA., CES., Ph.D. Anggota/Penguji Eksternal

Ditetapkan di Jakarta
 Pada tanggal, 29 Mei 2023

REKTOR UNIVERSITAS TARUMANAGARA



AGUSTINUS PURNA IRAWAN



**MODEL CAMPURAN BETON GEOPOLIMER
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *DEEP LEARNING***

DISERTASI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan mendapat gelar

DOKTOR

Dalam Ilmu Teknik Sipil

AGUSTINUS AGUS SETIAWAN

Nomor Induk Mahasiswa : 328201012

UNIVERSITAS TARUMANAGARA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL

JAKARTA, MEI 2023



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TARUMANAGARA
JAKARTA**

LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Agustinus Agus Setiawan
NIM : 328201012
Program Studi : Doktor Teknik Sipil

adalah mahasiswa Program Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara yang telah menyusun disertasi dengan judul:

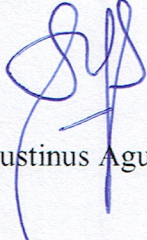
**MODEL CAMPURAN BETON GEOPOLIMER
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *DEEP LEARNING***

Dengan ini menyatakan bahwa:

Disertasi yang saya susun merupakan hasil pemikiran sendiri secara orisinal dan saya susun sendiri secara mandiri dengan tidak melanggar kode etik karya cipta. Apabila dikemudian hari ternyata disertasi ini terbukti melanggar kode etik karya cipta dan atau merupakan karya yang dikategorikan mengandung unsur plagiarisme, maka saya bersedia menerima sanksi administratif dan sanksi akademik dari Universitas Tarumanagara.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan benar dan tanpa tekanan dari pihak manapun.

Jakarta, Mei 2023
Yang membuat pernyataan


Agustinus Agus Setiawan



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TARUMANAGARA
JAKARTA**

LEMBAR PERSETUJUAN DISERTASI

Nama : Agustinus Agus Setiawan
NIM : 328201012
Program Studi : Doktor Teknik Sipil

Judul Disertasi

**MODEL CAMPURAN BETON GEOPOLIMER
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *DEEP LEARNING***

Telah diuji pada sidang Terbuka/Promosi pada tanggal 30 Mei 2023 dan dinyatakan lulus, dengan majelis penguji terdiri dari:

1. Ketua : Prof. Dr. Ir. Agustinus Purna Irawan, M.T., M.M, IPU, AE
2. Anggota : Prof. Ir. Roesdiman Soegiarso, M.Sc, PhD.
Prof. Dr. Ing. Harianto Hardjasaputra
Dr. Ir. Najid, M.T.
Lina, S.T., M.Kom., PhD
Ir. Joko Harsono Widjaja, M.Eng., PhD

Jakarta, 30 Mei 2023

Promotor Utama,

Prof. Ir. Roesdiman Soegiarso, M.Sc., PhD

Promotor Pendamping,

Prof. Dr. Ing. Harianto Hardjasaputra



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TARUMANAGARA
JAKARTA**

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Nama : Agustinus Agus Setiawan
NIM : 328201012
Program Studi : Doktor Teknik Sipil

Judul Disertasi

**MODEL CAMPURAN BETON GEOPOLIMER
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *DEEP LEARNING***

Telah dinyatakan lulus serta telah mendapatkan persetujuan dari tim Promotor dan Dewan Penguji sehingga dapat diterima sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar

DOKTOR

Dalam Ilmu Teknik Sipil

Jakarta, 30 Mei 2023

Mengesahkan
Ketua Program Studi,

Dr. Ir. Najid, MT.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat, rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Penelitian yang berjudul "Model Campuran Beton Geopolimer Dengan Menggunakan Metode *Deep Learning*" disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil dari Universitas Tarumanagara.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan penelitian pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil ini, penulis mendapatkan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu penulis di antaranya:

1. Prof. Dr. Ir. Agustinus Purna Irawan, MM., MT., IPU ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Tarumanagara
2. Bapak Harto Tanujaya, ST., MT., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara
3. Dr. Ir. Najid, MT selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara dan dosen penguji internal
4. Prof. Ir. Roesdiman Soegiarso, M.Sc., Ph.D selaku promotor utama
5. Prof. Dr. Ing. Harianto Hardjasaputra selaku promotor pendamping
6. Ibu Lina, S.T., M.Kom., PhD, selaku dosen penguji internal
7. Ir. Joko Harsono Widjaja, M.Eng, PhD, selaku dosen penguji eksternal
8. Seluruh rekan mahasiswa Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara

Penulis berharap semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi para akademisi dan industri khususnya di bidang material beton geopolimer, serta dapat dijadikan salah satu rujukan bagi peneliti atau penulis karya ilmiah lainnya. Akhir kata penulis berharap agar para pembaca dapat memberikan kritik, saran dan masukan dalam rangka proses penelitian berikutnya.

Jakarta, 30 Mei 2023

Penulis,

ABSTRAK

Beton geopolimer adalah bahan konstruksi ramah lingkungan yang inovatif. Limbah *fly ash* digunakan sebagai pengganti semen pada beton konvensional. Metode standar untuk merancang campuran beton geopolimer belum diatur dalam peraturan resmi khususnya di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model desain campuran beton geopolimer. Model dikembangkan menggunakan metode Deep Learning dan algoritma Convolutional Neural Network (CNN). Arsitektur CNN yang dipilih adalah arsitektur LeNet, ResNet dan AlexNet. Dari ketiga jenis arsitektur yang dipilih, kombinasi LeNet dengan 5000 *epochs*, nilai *learning rate* 0,001 dan dengan fungsi pengoptimal RMSprop, mampu menghasilkan model dengan tingkat akurasi pelatihan terbaik sebesar 93,13%, dan akurasi pengujian sebesar 83,46 %. Sedangkan kombinasi arsitektur AlexNet dengan 2000 *epochs*, *learning rate* 0,001 dan Adam optimizer mampu menghasilkan tingkat akurasi pelatihan sebesar 92,25%, dan akurasi pengujian sebesar 86,30%. Sedangkan kombinasi kombinasi arsitektur ResNet, dengan 5000 *epochs*, *learning rate* 0,001 dan *optimizer* Adam, mampu menghasilkan tingkat akurasi pelatihan sebesar 88,59%, dan akurasi pengujian sebesar 74,94%.

Kata Kunci : *deep learning, convolutional neural network, epoch, learning rate, optimizer, beton, geopolimer*

ABSTRACT

Geopolymer concrete is an innovative environmentally friendly construction material. Fly ash waste is used as a substitute for cement in conventional concrete. Standardized methods for designing geopolymer concrete mixes have not been regulated in official regulations, especially in Indonesia. This study aims to develop a model for the design of geopolymer concrete mixes. The model was developed using the Deep Learning method and the Convolutional Neural Network (CNN) algorithm. The selected CNN architectures are the LeNet, ResNet and AlexNet architectures. Of the three types of architecture chosen, the combination of LeNet with 5000 epochs, a learning rate value of 0.001 and with the RMSprop optimizer function, was able to produce a model with the best training accuracy rate of 93.13%, and testing accuracy of 83.46%. Meanwhile, the combination of the AlexNet architecture, with 2000 epochs, a learning rate of 0.001 and the Adam optimizer, was able to produce a training accuracy rate of 92.25%, and a testing accuracy of 86.30%. Meanwhile, the combination of the ResNet architecture combination, with 5000 epochs, a learning rate of 0.001 and the Adam optimizer, is capable of producing a training accuracy rate of 88.59%, and a testing accuracy of 74.94%.

Keywords: deep learning, convolutional neural network, epoch, learning rate, optimizer, concrete, geopolymer

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN.....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN DISERTASI.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	6
1.3 Batasan Masalah	7
1.4 Perumusan Masalah	8
1.5 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	8
1.6 Manfaat Penelitian	9
1.7 Sistematika Penulisan	10
BAB 2. KAJIAN PUSTAKA dan KERANGKA BERPIKIR.....	11
2.1 Beton Geopolimer.....	11
2.2 Jaringan Saraf Tiruan (<i>Artificial Neural Network</i>) dan <i>Deep Learning</i>	18
2.3 <i>Optimizer</i>	32
2.4 <i>Confusion Matrix</i>	34
2.5 Kerangka Berpikir.....	36
2.6 Hipotesis Penelitian	38
BAB 3. METODE PENELITIAN	39
3.1 Metode Penelitian	39
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	41
3.3 Populasi dan Instrumen Penelitian.....	41
3.4 Rencana Analisis Data	43
BAB 4. ANALISA DATA DAN HASIL PENELITIAN	45
4.1 Pengumpulan Data Primer	45

4.1.1	Bahan Penyusun Beton Geopolimer	45
4.1.2	Perancangan Campuran	46
4.1.3	Proses Perawatan Benda Uji	48
4.1.4	Kuat Tekan Beton	48
4.2	Pemodelan Jaringan Saraf Tiruan	52
4.2.1	Lingkungan Uji Coba	52
4.2.2	Dataset Pengujian	53
4.2.3	Tahap Uji Coba Klasifikasi	56
4.2.4	Rekapitulasi Hasil Uji Coba Klasifikasi	81
4.3	Perancangan Sistem Antarmuka	86
4.4	Analisis <i>Embodied Carbon</i> (CO _{2-e})	93
BAB 5. KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN		100
5.1	Kesimpulan	100
5.2	Implikasi	102
5.3	Saran	102
DAFTAR PUSTAKA		104
INDEKS		110
Lampiran 1. Data Primer		112
Lampiran 2. Data Sekunder		122
Lampiran 3. Hasil Pemeriksaan Data Outlier		138
Lampiran 4. Listing Program LeNet		160
Lampiran 5. Listing Program ResNet		166
Lampiran 6. Listing Program AlexNet		172
Lampiran 7. Listing Program GUI		178
Lampiran 8. Model Perancangan Campuran Beton Geopolimer Dengan Metode Regresi		182

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbedaan Kimiawi Abu Terbang Kelas F dan C [35]	15
Tabel 3. 1 Proses Pembuatan Beton Geopolimer	42
Tabel 3. 2 Variasi Benda Uji Berdasarkan Target Kuat Tekan dan Molaritas NaOH	43
Tabel 4. 1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik Agregat	45
Tabel 4. 2 Hasil X-Ray Fluorescence (XRF).....	45
Tabel 4. 3 Perancangan Campuran Beton Geopolimer	47
Tabel 4. 4 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Rerata	49
Tabel 4. 5 Hasil Analisis Deskriptif Data Primer	53
Tabel 4. 6 Hasil Analisis Deskriptif Data Sekunder	55
Tabel 4. 7 Arsitektur Le Net	57
Tabel 4. 8 Nilai Akurasi, MAE, MSE, dan RMSE Dengan Arsitektur Le Net.....	57
Tabel 4. 9 <i>Confussion Matrix, Testing Accuracy, Precision, Recall</i> , dan <i>F1-Score</i> Arsitektur Le Net	58
Tabel 4. 10 Arsitektur ResNet	65
Tabel 4. 11 Nilai Akurasi, MAE, MSE, dan RMSE Dengan Arsitektur ResNet.....	66
Tabel 4. 12 <i>Confussion Matrix, Testing Accuracy, Precision, Recall</i> , dan <i>F1-Score</i> Arsitektur ResNet	67
Tabel 4. 13 Arsitektur Alex Net.....	74
Tabel 4. 14 Nilai Akurasi, MAE, MSE, dan RMSE Dengan Arsitektur Alex Net	74
Tabel 4. 15 <i>Confussion Matrix, Testing Accuracy Precision, Recall</i> , dan <i>F1-Score</i> Arsitektur AlexNet.....	75
Tabel 4. 16 Pemilihan Model Jaringan Untuk Digunakan Dalam Pembuatan GUI	87
Tabel 4. 17 Hasil Verifikasi Aplikasi Terhadap Data Latih.....	89
Tabel 4. 18 Hasil Validasi Nilai Kuat Tekan Beton Aktual dan Mix Design Menggunakan Aplikasi.....	92
Tabel 4. 19 Emisi Gas CO ₂ Pada Proses Manufaktur NaOH [66]	95
Tabel 4. 20 Emisi Gas CO ₂ Pada Proses Manufaktur Na ₂ SiO ₃ [66]	96
Tabel 4. 21 Faktor Karbon A1-A3 [65, 66, 68]	96
Tabel 4. 22 Faktor Karbon A4 [65]	96
Tabel 4. 23 Faktor Limbah, WF [65]	97
Tabel 4. 24 Rancangan Campuran Beton Mutu $f'_c = 50$ MPa	98
Tabel 4. 25 Perhitungan Karbon Terkandung (Embodied Carbon)	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Pertumbuhan Jumlah Kapasitas Terpasang (MW) Perusahaan Listrik Negara (PLN) menurut Jenis Pembangkit Listrik (https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/1110)	3
Gambar 1. 2 Ilustrasi <i>Deep Learning</i> Sebagai Himpunan Bagian Dari ML dan AI	5
Gambar 2. 1 Reaksi disolusi Si dan Al dalam larutan alkalin	12
Gambar 2. 2 Ikatan Al dan Si pada geopolimer [33]	13
Gambar 2. 3 (a) Hasil Reaksi Hidrasi Semen Portland; (b) Hasil Reaksi Geopolimerisasi.....	14
Gambar 2. 4 Susunan Jaringan Saraf Manusia [43].....	19
Gambar 2. 5 Arsitektur Jaringan <i>Perceptron</i> [43]	21
Gambar 2. 6 Arsitektur MLP Sederhana [23]	22
Gambar 2. 7 Arsitektur Jaringan CNN [26].....	23
Gambar 2. 8 Arsitektur Jaringan CNN Le Net.....	24
Gambar 2. 9 Arsitektur Jaringan Alex Net	24
Gambar 2. 10 Arsitektur Jaringan VGG-16 [47]	25
Gambar 2. 11 Arsitektur Jaringan CNN ResNet [48]	25
Gambar 2. 12 Arsitektur Jaringan CNN Inception	26
Gambar 2. 13 Operasi konvolusi dengan <i>stride</i> , $s = 1$, <i>filter</i> , $f = 3$, dan <i>padding</i> , $p = 1$	27
Gambar 2. 14 Operasi padding, $p = 1$	27
Gambar 2. 15 Operasi Konvolusi Dengan <i>Stride</i> , $s = 2$	28
Gambar 2. 16 Fungsi undak biner (<i>hard limit</i>)	29
Gambar 2. 17 Fungsi <i>Sigmoid Biner</i>	29
Gambar 2. 18 Fungsi tanh.....	30
Gambar 2. 19 Fungsi ReLU	30
Gambar 2. 20 Proses <i>Pooling</i> (a) <i>Max pooling</i> ; (b) <i>Average Pooling</i>	31
Gambar 2. 21 Proses <i>Flattening Data</i>	31
Gambar 2. 22 <i>Confusion Matrix</i>	35
Gambar 2. 23 Kerangka Berpikir.....	38
Gambar 3. 1 Metodologi Pengembangan Model Jaringan Saraf Tiruan Metode CNN.....	40
Gambar 4. 1 Hasil X-Ray Fluorecence (XRF).....	46
Gambar 4. 2 NaOH Padat dan Larutan Na_2SiO_3	46
Gambar 4. 3 Proses <i>Steam Curing</i>	48
Gambar 4. 4 Proses Perendaman Benda Uji	48
Gambar 4. 5 Hubungan Antara Molaritas Larutan NaOH Terhadap Kuat Tekan	50
Gambar 4. 6 Rasio SS/SH Terhadap Kuat Tekan	52
Gambar 4. 7 Rasio AL/FA Terhadap Kuat Tekan	52
Gambar 4. 8 Hasil Akurasi Pelatihan Dari Berbagai Fungsi <i>Optimizer</i>	82
Gambar 4. 9 Hasil Akurasi Pengujian Dari Berbagai Fungsi <i>Optimizer</i> dan Arsitektur CNN	82
Gambar 4. 10 Perbandingan Jumlah <i>Epochs</i> Terhadap Tingkat Akurasi Pelatihan (<i>Train Accuracy</i>).....	83
Gambar 4. 11 Perbandingan Jumlah <i>Epochs</i> Terhadap Tingkat Akurasi Pengujian (<i>Testing Accuracy</i>).....	84
Gambar 4. 12 Hubungan Antara <i>Learning Rate</i> dengan Tingkat Akurasi Pelatihan (<i>Train Accuracy</i>).....	85
Gambar 4. 13 Hubungan Antara <i>Learning Rate</i> dengan Tingkat Akurasi Pengujian (<i>Testing Accuracy</i>).....	86

Gambar 4. 14 Tampilan Halaman Depan Program Visual Studio Code.....	86
Gambar 4. 15 Klasifikasi Campuran Beton Geopolimer Kelas 1 ($f'_c < 20$ MPa) Menggunakan GUI Arsitektur ResNet	88
Gambar 4. 16 Klasifikasi Campuran Beton Geopolimer Kelas 2 ($f'_c = 20$ MPa) Menggunakan GUI Arsitektur LeNet Kelas	88
Gambar 4. 17 Klasifikasi Campuran Beton Geopolimer Kelas 3 ($f'_c = 25$ MPa) Menggunakan GUI Arsitektur LeNet.....	88
Gambar 4. 18 Klasifikasi Campuran Beton Geopolimer Kelas 8 ($f'_c = 50$ MPa) Menggunakan GUI Arsitektur LeNet.....	89
Gambar 4. 19 Klasifikasi Campuran Beton Geopolimer Kelas 9 ($f'_c > 55$ MPa) Menggunakan GUI Arsitektur AlexNet	89
Gambar 4. 20 Pengujian Terhadap Data Hasil Penelitian Azarsa et.al [72]	90
Gambar 4. 21 Pengujian Terhadap Data Hasil Penelitian Salsabila et.al [73].....	91
Gambar 4. 22 Pengujian Terhadap Data Hasil Penelitian Vijay, K. et.al [74].....	92
Gambar 4. 23 Emisi Karbon dan Daur Hidup Proses Konstruksi [65]	94
Gambar 4. 24 Perbandingan <i>Embodied Carbon</i> Pada Beton Normal dan Beton Geopolimer.	99