

DAFTAR ISI

PERNYATAAN.....	ii
PRAKATA.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
INTISARI.....	x
ABSTRACT.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Batasan Masalah.....	6
1.4 Tujuan.....	6
1.5 Manfaat.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
BAB III LANDASAN TEORI.....	16
3.1 Mineral pada Batuan.....	16
3.2 Citra CT.....	16
3.2.1 X-ray microtomography.....	17
3.3 Deep Learning (DL).....	18
3.3.1 Regularisasi.....	20
3.3.2 Fungsi aktivasi.....	21
3.3.3 Metrik evaluasi.....	22
3.3.4 Loss function.....	24
3.4 CNN.....	25
3.4.1 Kernel (Filter).....	26
3.4.2 Pooling.....	27
3.5 RNN.....	28
3.5.1 Long-Short Term Memory (LSTM) Unit.....	29
3.5.2 Convolutional LSTM (ConvLSTM).....	30
3.6 U-Net.....	31
3.6.1 Konvolusi 3D.....	33
3.6.2 Attention gate.....	34
3.7 Fitur Perubahan Spasial.....	35
3.8 Image Segmentation.....	37
3.9 Pixel-Level Class Weighting (PCW).....	37
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN.....	41
4.1 Alat & Bahan.....	41
4.2 Pengumpulan Data.....	42
4.3 Analisis dan Perancangan Sistem.....	46
4.3.1 Representasi data volumetrik sebagai data sekuensial.....	49
4.3.2 Pixel-level class weighting (PCW).....	50
4.3.3 Rancangan arsitektur LSTM U-Net.....	51
4.3.4 Rancangan arsitektur Frame Difference U-Net.....	55

4.3.5 Rancangan arsitektur <i>2-Stream</i> U-Net	56
4.4 Evaluasi	59
BAB V IMPLEMENTASI	61
5.1 Spesifikasi <i>Hardware</i> dan <i>Software</i>	61
5.2 Implementasi Pra-pemrosesan	61
5.3 Implementasi Generator Data	64
5.4 Implementasi Arsitektur Model	65
5.4.1 Implementasi model LSTM U-Net	65
5.4.2 Implementasi model <i>Frame Difference</i> U-Net	67
5.4.3 Implementasi model <i>2-Stream</i> U-Net	71
5.5 Implementasi Proses Pelatihan	74
5.6 Implementasi Evaluasi Model	76
BAB VI HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	80
6.1 Hasil Organisasi Data	80
6.2 Hasil Augmentasi Data	80
6.3 Hasil Pelatihan Model	81
6.3.1 Hasil pelatihan dan perbandingan hasil evaluasi tiap model	81
6.3.2 Hasil pelatihan model dengan penerapan PCW	84
6.3.3 Analisis <i>confusion matrix</i> pada hasil penerapan PCW	88
6.3.4 Analisis detail pengaruh panjang sekuen terhadap performa model	92
6.4 Perbandingan dengan <i>State-of-the-art</i> Model	94
6.4.1 Evaluasi menggunakan <i>row-wise normalized confusion matrix</i>	94
6.4.2 Evaluasi menggunakan <i>raw pixel count confusion matrix</i>	97
6.4.3 Analisis visualisasi hasil segmentasi	103
6.5 Evaluasi Komputasi Model	106
6.6 Rekomendasi	109
BAB VII PENUTUP	111
7.1 Kesimpulan	111
7.2 Saran	112
DAFTAR PUSTAKA	114
LAMPIRAN	120
A. Lanjutan Hasil Augmentasi Sekuen Citra	120

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Contoh sampel batuan pasir	16
Gambar 3.2 Komponen utama pada pemindai mikrotomografi sinar-x (Boerckel dkk., 2014)	17
Gambar 3.3 Ilustrasi representasi data yang dipelajari oleh sebuah model klasifikasi tipe rumah.....	19
Gambar 3.4 Ilustrasi dari sebuah jaringan saraf standar sebelum (A) dan sesudah diaplikasikan regularisasi <i>dropout</i> (B)	21
Gambar 3.5 Fungsi aktivasi dari kiri ke kanan: ReLu, Tanh, dan Sigmoid.....	22
Gambar 3.6 Visualisasi proses operasi konvolusi.....	27
Gambar 3.7 Visualisasi operasi <i>max pooling</i>	28
Gambar 3.8 Visualisasi RNN di mana hasil output dijadikan sebagai input pada <i>layer</i> sebelumnya	29
Gambar 3.9 Visualisasi <i>gates</i> pada sel LSTM	30
Gambar 3.10 Contoh sebuah arsitektur U-Net.....	32
Gambar 4.1 Salah satu irisan dari sampel silinder batu pasir Bentheimer (a) dan irisan citranya yang menjadi bentuk kubus berukuran 624x624x624 <i>voxel</i> (b) beserta dengan histogramnya (c).....	43
Gambar 4.2 Sampel irisan citra mentah hasil pemindaian batuan Bentheimer beserta dengan label dari hasil segmentasi oleh Liang dkk., (2020)	45
Gambar 4.3 Rancangan umum sistem.....	46
Gambar 4.4 Alur kerja generator sekuen citra	47
Gambar 4.5 Proses pelatihan dan validasi model.....	48
Gambar 4.6 Contoh sekuen irisan citra dari sumbu X sampel C yang menunjukkan adanya kontinuitas spasial antar irisan.....	50
Gambar 4.7 Diagram alur generator <i>Pixel-evel Class Weighting</i> (PCW).....	51
Gambar 4.8 Visualisasi keluaran yang dihasilkan oleh generator berbasis PCW. 52	
Gambar 4.9 Arsitektur LSTM U-Net	53
Gambar 4.10 Struktur internal unit ConvLSTM2D	54
Gambar 4.11 Arsitektur <i>Frame Difference</i> U-Net	56
Gambar 4.12 Arsitektur <i>2-Stream</i> U-Net.....	57
Gambar 5.1 Proses pembagian data dari 6 sekuen panjang awal menjadi 40 subsekuen untuk data pelatihan dan validasi	62
Gambar 5.2 Kode fungsi augmentasi sekuen citra.....	63
Gambar 5.3 Kode fungsi generator data input untuk model	64
Gambar 5.4 Kode program untuk pembuatan Blok Model LSTM U-Net	65
Gambar 5.5 Contoh citra <i>frame difference</i> dari sekuen citra input dengan panjang sekuen 3.....	68
Gambar 5.6 Kode program pembuatan Model Frame Difference U-Net	68
Gambar 5.7 Kode Program untuk Blok <i>Stream</i> Spasial dan <i>Stream</i> Perubahan Spasial	72
Gambar 5.8 Kode program untuk pembuatan Blok Attention Gate dan Blok Fusion	72

Gambar 5.9 Kode program untuk pembuatan Model <i>2-Stream</i> U-Net.....	73
Gambar 5.10 Program untuk menghitung loss dari model saat proses pelatihan dan validasi	74
Gambar 5.11 Program untuk melakukan pelatihan dan validasi model dengan TensorFlow	75
Gambar 5.12 Program untuk evaluasi hasil prediksi model	78
Gambar 5.13 Kode fungsi untuk konversi confusion matrix menjadi Row-Wise Normalized Confusion Matrix	79
Gambar 6.1 Contoh label dari sebuah sekuen citra dari dataset sebelum (atas) dan sesudah (bawah) dilakukan augmentasi seperti flipping.....	81
Gambar 6.2 History plot untuk training & validation loss model LSTM U-Net..	83
Gambar 6.3 <i>History plot</i> untuk <i>training & validation loss</i> model <i>Frame Difference</i> U-Net.....	83
Gambar 6.4 History plot untuk training & validation loss model <i>2-Stream</i> U-Net	83
Gambar 6.5 <i>History plot training</i> untuk model tanpa (kiri) dan dengan (kanan) pembobotan <i>Pixel Level Class Weighting</i> (PCW)	86
Gambar 6.6 Hasil segmentasi citra untuk model tanpa (kiri) dan dengan (kanan) pembobotan <i>Pixel Level Class Weighting</i> (PCW)	88
Gambar 6.7 Perbandingan <i>confusion matrix</i> untuk model segmentasi LSTM U-Net (atas), <i>Frame Difference</i> U-Net (tengah), dan <i>2-Stream</i> U-Net (bawah). baik tanpa PCW (kiri) atau dengan PCW (kanan).....	90
Gambar 6.8 Grafik <i>History plot</i> dari <i>Training & Validation Loss</i> dari untuk model LSTM U-Net dengan variasi panjang sekuen input 2 hingga 7	92
Gambar 6.9 Grafik F1-Score dan Class IoU terhadap variasi panjang sekuen input untuk model LSTM U-Net.....	94
Gambar 6.10 <i>Row-wise normalized confusion matrix</i> untuk masing-masing model	95
Gambar 6.11 <i>Raw Pixel Count Confusion Matrix</i> untuk masing-masing model.101	
Gambar 6.12 Contoh <i>error map</i> untuk hasil prediksi segmentasi dari tiap model, piksel putih merepresentasikan segmentasi yang salah dan piksel hitam menandakan segmentasi yang benar pada sampel A	104
Gambar 6.13 Contoh hasil segmentasi lebih detail dari tiap kelas untuk seluruh model pada sampel A	105
Gambar 6.14 Contoh <i>error map</i> untuk hasil prediksi segmentasi dari tiap model, piksel putih merepresentasikan segmentasi yang salah dan piksel hitam menandakan segmentasi yang benar pada sampel B	106
Gambar 6.15 Contoh hasil segmentasi lebih detail dari tiap kelas untuk seluruh model pada sampel B	107
Gambar 6.16 Contoh <i>error map</i> untuk hasil prediksi segmentasi dari tiap model, piksel putih merepresentasikan segmentasi yang salah dan piksel hitam menandakan segmentasi yang benar pada sampel C	108
Gambar 6.17 Contoh hasil segmentasi lebih detail dari tiap kelas untuk seluruh model pada sampel C	109
Gambar A.1 Sampel citra label dari sekuen citra pada dataset sebelum (atas) dan sesudah (bawah) dilakukan augmentasi rotasi	120



UNIVERSITAS
GADJAH MADA

**METODE DEEP LEARNING BERBASIS FITUR PERUBAHAN SPASIAL UNTUK SEGMENTASI
MULTI-MINERAL PADA CITRA
MICRO-CT BATUAN**

Ridho Adiwignyo Yusuf, Dr.techn Aupaclav Zatu Kusuma Frisky, S.Si, M.Sc

Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Gambar A.2 Sampel citra label dari sekuen citra pada dataset sebelum (atas) dan sesudah (bawah) dilakukan augmentasi rotasi, *cropping* dan *zooming* 121

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan pustaka	14
Tabel 4.1 Persentase piksel untuk tiap kelas pada dataset citra <i>micro-CT</i> batuan Bentheimer	41
Tabel 4.2 Citra <i>micro-CT</i> batuan pasir Bentheimer (Liang dkk., 2020).....	42
Tabel 5.1 Detail arsitektur model LSTM U-Net	66
Tabel 5.2 Detail arsitektur model <i>Frame Difference</i> U-Net	69
Tabel 5.3 Detail arsitektur model <i>2-Stream</i> U-Net	73
Tabel 6.1 Hasil evaluasi model tanpa pembobotan dengan variasi panjang sekuen citra input	84
Tabel 6.2 Hasil segmentasi model setelah penerapan PCW pada model-model dengan augmentasi data	87
Tabel 6.3 Hasil segmentasi model LSTM U-Net dengan variasi panjang sekuen input	93
Tabel 6.4 Perbandingan hasil evaluasi model untuk tiap model berdasarkan hasil <i>row-wise normalized confusion matrix</i>	97
Tabel 6.5 Perbandingan hasil evaluasi model untuk tiap model berdasarkan hasil <i>raw pixel count confusion matrix</i>	102
Tabel 6.6 Perbandingan hasil kebutuhan komputasi tiap model.....	109