

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN .....	iv
MOTO .....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR ISTILAH .....	xvi
DAFTAR SINGKATAN .....	xix
INTISARI.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	8
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian .....	8
1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian .....	9
1.5 Tinjauan Pustaka .....	9
1.6 Keaslian Penelitian.....	20
1.7 Bagan Alir Kerangka Pikir Penelitian.....	40
BAB II. METODE PENELITIAN .....	42
2.1 Metode Pengumpulan data.....	42
2.1.1 Perekaman data tiga dimensi (3D).....	42
2.1.2 Wawancara.....	49
2.1.3 Studi pustaka .....	50
2.2 Alat dan Bahan .....	50
2.2.1 Perangkat Keras (Hardware) Untuk Pengambilan Data 3D .....	51
2.2.2 Perangkat Lunak (Software) Untuk Pengolahan Data 3D .....	52
2.3 Pengolahan Data Tiga Dimensi (3D) .....	53
2.4 Analisis Data .....	54
BAB III. GAMBARAN UMUM PELESTARIAN CANDI BOROBUKUR.....	58
3.1 Sejarah Penyelamatan Candi Borobudur.....	59
3.2 Candi Borobudur Sebagai Warisan Dunia (World Heritage).....	61

3.2.1	Nilai Universal Luar Biasa (Outstanding Universal Value/OUV) .....	63
3.2.2	Keaslian' (authenticity) dan 'Keutuhan' (integrity).....	64
3.3	Manajemen Pengelolaan Candi Borobudur Sebagai Warisan Dunia (World Heritage) .....	66
3.3.1	Kerangka Hukum Pengelolaan Candi Borobudur.....	68
3.3.2	Ruang Lingkup dan Zonasi Pengelolaan Kawasan Candi Borobudur.....	71
3.3.3	Balai Konservasi Borobudur .....	75
3.3.4	PT. Taman Wisata Candi Borobudur, Prambanan dan Ratu Boko.....	80
3.4	Kondisi Keterawatan Candi Borobudur ( <i>State of Conservation</i> ).....	82
3.4.1	Pemantauan Reaktif (reaktif monitoring) UNESCO .....	84
3.4.2	Potensi Ancaman Kondisi Keterawatan ( <i>State Of Conservation</i> ) Candi Borobudur.....	87
3.5	Monitoring Kondisi Keterawatan Candi Borobudur ( <i>State of Conservation</i> ).....	94
3.6	Perekaman Data Tiga Dimensi (3D), Dokumentasi dan Manajemen Informasi Candi Borobudur.....	99
3.6.1	Perkembangan Dokumentasi Pada Masa Pemugaran Candi Borobudur.....	101
3.6.2	Perkembangan Dokumentasi Pada Pasca Pemugaran Candi Borobudur.....	107
 <b>BAB IV. PEREKAMAN TIGA DIMENSI (3D) CANDI BOROBUDUR DAN AKUISISI DATA.....</b>		<b>112</b>
4.1	Perekaman Data Tiga Dimensi (3D) dengan Teknologi Lidar TLS ( <i>Terrestrial Laser Scanning</i> ) .....	113
4.1.1	Survey Lokasi dan Persiapan Awal .....	113
4.1.2	Proses Pemindaian Obyek ( <i>scanning</i> ).....	117
4.2	Perekaman Data Tiga Dimensi (3D) dengan <i>Teknik Digital Photogrammetry</i> .....	124
4.3	Post Processing Data Hasil Perekaman Tiga Dimensi (3D) .....	128
4.3.1	<i>Post processing</i> data Lidar TLS ( <i>Terrestrial Laser Scanning</i> ) .....	128
4.3.2	<i>Post processing</i> data <i>Digital Photogrammetry</i> .....	139
4.5	Sasaran dan Tingkat Akurasi Penggunaan Metode Terrestrial Laser Scanning dan digital photogrametry untuk Perekaman Candi Borobudur .....	148
4.4	Kendala dan Kelemahan Metode .....	150
 <b>BAB V. PEMANFAATAN DIGITAL TEKNOLOGI TIGA DIMENSI UNTUK PELESTARIAN CANDI BOROBUDUR .....</b>		<b>153</b>
5.1	Peran Teknologi Tiga Dimensi Dalam Perencanaan Pekerjaan Konservasi dan Pemugaran .....	153

5.2	Peran Teknologi Tiga Dimensi Dalam Monitoring Pelestarian Candi Borobudur .....	160
5.3	Peran Teknologi Tiga Dimensi Sebagai Media Edukasi Pelestarian .....	164
5.4	Garis Besar Pemanfaatan Digital Teknologi Dalam Pengelolaan Candi Borobudur Sebagai Warisan Budaya Dunia ( <i>world cultural heritage</i> ) .....	170
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....		176
6.1	Kesimpulan.....	176
6.2	Saran.....	179
DAFTAR PUSTAKA .....		184
LAMPIRAN .....		187

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kondisi Candi Borobudur sebelum pemugaran I oleh Van Erp	3
Gambar 1.2	Hasil Pemindaian tiga dimensi (3D) Gereja Abbey of Ottmarsheim	12
Gambar 1.3	Hasil Pemindaian tiga dimensi (3D) Remigia Cave	13
Gambar 1.4	Hasil pemindaian tiga dimensi (3D) dan analisis gambar cadas Gua Wadi Sura	14
Gambar 1.5	Hasil pemindaian tiga dimensi (3D) <i>point clouds Siq route</i>	15
Gambar 1.6	Hasil pemindaian tiga dimensi (3D) salah satu situs di Petra Qasr Al Bint, Jordan	15
Gambar 1.7	Hasil pemindaian tiga dimensi (3D) Wonderwerk Cave	17
Gambar 1.8	Foto-realistis dari teknik digital fotogrametri tanpa distorsi dan perbandingan dengan teknologi foto lama	19
Gambar 1.9	Hasil analisis yang berupa DEM ( <i>digital elevation model</i> ) untuk mengetahui kondisi deformasi yang terjadi	19
Gambar 1.10	Bagan klasifikasi metode perekaman warisan budaya berdasarkan metode, jenis sensor dan dimensi	17
Gambar 1.11	Metode perekaman data berdasarkan ukuran (skala) dan kompleksitas data.	28
Gambar 1.12	<i>Lidar</i> Teknologi (a) TLS (Terrestrial laser scanning) (b) ALS (Airborne laser scanning)	30
Gambar 1.13	<i>Close range laser scanning / portable handheld scanning</i>	31
Gambar 1.14	<i>Terrestrial Laser Scanning (TLS)</i>	32
Gambar 1.15	<i>Airborne Laser Scanning (ALS)</i>	32
Gambar 1.16	Prinsip pengukuran jarak <i>pulse-based scanners</i>	33
Gambar 1.17	Prinsip pengukuran jarak <i>phase-based laser scanners</i>	35
Gambar 1.18	Prinsip pengukuran jarak <i>triangulation-based scanners</i>	37
Gambar 1.13	Bagan Alir Kerangka Pikir Penelitian	41
Gambar 2.1	<i>Acquire photo image</i>	44
Gambar 2.2	Hasil <i>scanning</i> objek (pemindaian 3D)	45
Gambar 2.3	Geometri pengambilan bidang terbuka ( <i>façade</i> )	47
Gambar 2.4	Geometri pengambilan foto pada interior dan bidang tertutup	47
Gambar 2.5	Perangkat / instrument TLS	51
Gambar 2.6	Proses perekaman tiga dimensi (3D) dan <i>post processing Terrestrial laser scanning (TLS)</i>	53
Gambar 2.7	Proses perekaman tiga dimensi (3D) <i>post processing digital photogrametry</i>	54
Gambar 2.8	Bagan alir analisis data	56

Gambar 3.1	Situasi Pemugaran Kedua Candi Borobudur (1973-1983)	60
Gambar 3.2	Tiga pilar dalam Nilai Universal Luar Biasa (OUV)	63
Gambar 3.3	Zonasi Pengelolaan Kawasan Candi Borobudur menurut JICA 1979	72
Gambar 3.4	Zonasi Pengelolaan Kawasan Candi Borobudur menurut Perpres No. 58 Tahun 2014	73
Gambar 3.5	Usaha perlindungan batu tangga dari keausan akibat pijakan kaki pengunjung	94
Gambar 3.7	Proses perekaman data dengan teknologi fotogrametri analog	105
Gambar 3.8	Dokumen foto lama proses perekaman data dengan teknologi fotogrametri	105
Gambar 3.9	Skema kerja perekaman data dengan teknologi fotogrametri (Sumber: Balai Konservasi Borobudur)	106
Gambar 3.10	Penggunaan teknologi 3D berbasis <i>terrestrial</i> pertama tahun 2005	109
Gambar 4.1	Posisi Titik berdiri (scanworld) alat di halaman	115
Gambar 4.2	Titik berdiri (scanworld) alat di bagian lorong	116
Gambar 4.3	Titik berdiri (scanworld) alat di teras stupa	116
Gambar 4.4	Posisi pemindaian laser arah vertical	117
Gambar 4.5	Hasil <i>acquired photo image</i>	118
Gambar 4.6	Posisi arah pemindaian ( <i>scan</i> )	119
Gambar 4.7	Titik pemindaian ( <i>scan</i> ) 3D Candi Borobudur posisi halaman 1 (H-1) dengan sudut 360° arah horisontal dan 270° arah vertikal	120
Gambar 4.8.	Titik pemindaian ( <i>scan</i> ) 3D Candi Borobudur posisi halaman 2 (H-2) dengan sudut 360° arah horisontal dan 270° arah vertikal	121
Gambar 4.9	Titik pemindaian ( <i>scan</i> ) 3D Candi Borobudur posisi halaman 3 (H-3) dengan sudut 360° arah horisontal dan 270° arah vertikal	121
Gambar 4.10	posisi arah pemindaian ( <i>scan</i> ) 3D Candi Borobudur posisi halaman 4 (H-4) dengan sudut 360° arah horisontal dan 270° arah vertical	122
Gambar 4.11	posisi arah pemindaian ( <i>scan</i> ) 3D Candi Borobudur posisi lorong dengan sudut 360° arah horisontal dan 270° arah vertical	122
Gambar 4.12	posisi arah pemindaian ( <i>scan</i> ) 3D Candi Borobudur Teras Stupa dengan sudut 360° arah horisontal dan 270° arah vertikal	123
Gambar 4.13	<i>Scanning target</i>	124
Gambar 4.14	Frame target kalibrasi pada <i>agisoft photoscan</i>	126
Gambar 4.15	Pengukuran titik kontrol jarak pada relief	126
Gambar 4.16	Geometri pengambilan foto pada relief	127
Gambar 4.17	Geometri pengambilan foto 360° pada stupa teras terbuka	128

Gambar 4.18	Data registrasi scan obyek Candi Borobudur 220 titik berdiri	130
Gambar 4.19	Posisi keseluruhan titik berdiri alat	131
Gambar 4.20	Proses registrasi point clouds bagian Kamadatu, Rupadatu dengan Arupadatu	131
Gambar 4.21	Posisi masing masing titik berdiri berdasarkan perbedaan warna..	132
Gambar 4.22	Hasil registrasi total 220 titik	132
Gambar 4.23	Hasil Hasil penggabungan data TLS dan <i>digital photogrammetry</i>	133
Gambar 4.24	Noise dari pengunjung yang lalu lalang di area pemindaian	134
Gambar 4.25	Produk 3D image relief ( <i>intensity colour map</i> )	135
Gambar 4.26	Produk 3D image candi ( <i>intensity colour map</i> )	135
Gambar 4.27	Produk 3D image candi total	135
Gambar 4.28	Asbuilt drawing 2D pagar langkan	137
Gambar 4.29	Asbuilt drawing 2D selasar sisi barat	137
Gambar 4.30	Hasil animasi Candi Borobudur	138
Gambar 4.31	Visual <i>True View</i> 360°	139
Gambar 4.32	Tampilan camera <i>calibration</i>	140
Gambar 4.33	Tampilan load data kalibrasi kamera pada <i>agisoft photoscan</i>	141
Gambar 4.34	Tampilan setelah data kalibrasi kamera di load	141
Gambar 4.35	Hasil proses alignment foto dalam bentuk <i>tie points</i>	142
Gambar 4.36	Hasil proses <i>dense cloud</i>	143
Gambar 4.37	Hasil pemodelan 3D relief Kapal Candi Borobudur	145
Gambar 4.38	Hasil pemodelan 3D stupa terbuka Candi Borobudur	146
Gambar 4.39	Hasil pemodelan arca singa Candi Borobudur	146
Gambar 4.40	Hasil <i>orthofoto</i> relief kapal Candi Borobudur	147
Gambar 4.41	Hasil animasi relief kapal Candi Borobudur	148
Gambar 5.1	Data dimensi geometri yang langsung dan mudah untuk diketahui	156
Gambar 5.2	Data elevasi bagian selasar Candi Borobudur	157
Gambar 5.3	Data dimensi relung hasil pemindaian	157
Gambar 5.4	Data 3D stupa induk hasil pemindaian	158
Gambar 5.5	Data 3D chatra induk hasil pemindaian	159
Gambar 5.6	Ilustrasi virtual pemasangan catra hasil pemindaian	159
Gambar 5.7	Hasil perekaman <i>orthofoto</i> yang sudah terkoreksi menggunakan digital fotogrametri	162
Gambar 5.8	Hasil segmentasi yang menunjukkan luasan salah satu jenis kerusakan	162
Gambar 5.9	Data luasan area kerusakan berdasarkan jenis kerusakannya	163
Gambar 5.10	Data panel hasil perekaman digital fotogrametri	163
Gambar 5.11	Hasil pengolahan data 3D sebaran nilai point x,y dan z	164
Gambar 5.12	Aplikasi Virtual Relief Karmawibhanga	167

Gambar 5.13	Tampilan aplikasi <i>Virtual Relief</i> Karmawibhangga yang informative dan menarik	167
Gambar 5.14	(a). hasil replika tengkorak hewan yang kecil. (b). proses cetak replika dengan printer 3D. (c). proses pembuatan replika menggunakan CNC <i>miling machine</i> . (d). hasil replika untuk menambal bagian wajah yang rusak	170
Gambar 5.15	Contoh tampilan HIM ( <i>Heritage Information Modelling</i> ) untuk bangunan kayu	173

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Tingkatan (level) Perekaman Data Warisan Budaya	29
Tabel 1.2	Kerangka kerja penggunaan teknologi dan alat dalam Perekaman Data Warisan Budaya ( Sumber : <i>Getty Conservation Institute</i> )	29
Tabel 1.3	Tingkat akurasi sistem <i>laser scanning</i> dan penggunaannya	34
Tabel 3.1	Kerangka kerja dalam definisi sistem manajemen warisan	70
Tabel 3.2	Peruntukan zonasi Kawasan Candi Borobudur menurut JICA 1979, Keppres No. 1 Tahun 1992 dan Perpres No. 58 Tahun 2014	74
Tabel 3.3	Potensi Ancaman Keterawatan Properti Warisan ( <i>threats of SOC</i> ) Candi Borobudur	83
Tabel 4.1	Rencana Perencanaan Jalur Titik Berdiri ( <i>scanworld</i> ) Alat	115
Tabel 4.2	Data Proses Pemindaian Lidar TLS ( <i>Terrestrial Laser Scanning</i> ) Candi Borobudur	129
Tabel 4.3	Data Perangkat lunak (software) perekaman data Lidar TLS ( <i>Terrestrial Laser Scanning</i> ) Candi Borobudur	129
Tabel 4.4	Hasil perataan berkas dan pemodelan 3D Relief Kapal dengan kontrol skala bar kamera terkalibrasi	144
Tabel 4.5	Klasifikasi sasaran perekaman obyek perekaman tiga dimensi dengan metode terestrial laser scanning (TLS) dan digital photogrammetry	149

## DAFTAR ISTILAH

Aerial	: sifat atau keadaan yang berkaitan dengan ruang udara
Arupadhatu	: tingkatan paling atas dari susunan Candi Borobudur yang merupakan perlambangan alam yang sudah terbebas dari hawa nafsu, masalah duniawi dan juga tidak terikat pada karma, pada wujud (tidak berwujud) atau rupa (tidak berupa)
<i>Carrying capacity</i> atau daya dukung	: Kemampuan suatu area atau sumberdaya untuk menampung beban atau mendukung suatu aktivitas
Database	: adalah kumpulan data yang disimpan secara sistematis di dalam komputer yang dapat diolah atau dimanipulasi menggunakan perangkat lunak (program aplikasi) untuk menghasilkan informasi. Pendefinisian basis data meliputi spesifikasi berupa tipe data, struktur data dan juga batasan-batasan pada data yang kemudian disimpan
<i>Dense Point Clouds</i>	: Kumpulan titik-titik yang rapat
<i>Distorsi</i>	: Kemelencengan atau ketidaksesuaian dengan bentuk semestinya. Misalnya, distorsi gambar adalah keadaan gambar yang tidak sesuai antara perbandingan panjang dan lebarnya
<i>Early Warning System</i>	: <i>sistem peringatan dini terhadap suatu gejala perubahan</i>
Ekspensial	: bersifat atau berhubungan dengan eksponen
Geometris	: bentuk-bentuk tertentu yang terukur dan dapat didefinisikan
Infiltrasi	: aliran <u>air</u> ke dalam <u>tanah</u> melalui permukaan tanah itu sendiri.
Jalur Siq	: celah yang terbentuk dari gempa tektonik yang membelah gunung menjadi dua bagian, celah ini merupakan pintu masuk utama ke situs tua dari kota Petra di sebelah selatan Yordania.
Kamadhatu	: tingkatan dasar atau bagian paling bawah candi borobudur yang merupakan perlambangan hawa nafsu, alam tempat bersemayamnya kesenangan duniawi, alam para manusia yang perilakunya masih diikat hawa nafsu
Kamera Mirrorless	: kamera yang pada dasarnya sama seperti kamera DSLR tapi tidak memakai cermin/pentaprisma.
Kawasan Strategis Nasional (KSN)	wilayah yang penataan ruangnya diprioritaskan karena mempunyai pengaruh sangat penting secara nasional terhadap kedaulatan negara, pertahanan dan

- Rektifikasi : suatu proses transformasi data dari satu sistem grid ke sistem grid yang lain sehingga menghasilkan proyeksi geometri yang sesuai
- Restorasi : mengembalikan bahan eksisting sebuah tempat pada keadaan semula sebagaimana yang diketahui dengan menghilangkan tambahan atau dengan meniru kembali komponen eksisting tanpa menggunakan material baru.
- Rupadhatu : tingkatan kedua dari susunan candi borobudur yang merupakan perlambangan alam dimana hawa nafsu dan keinginan yang bersifat duniawi sudah terbebas dari diri manusia dan juga tidak lagi diikat karma namun masih diikat oleh bentuk fisik atau rupa dalam arti manusia masih memandang sebatas pada dunia wujud atau dunia nyata
- Scanworld* : titik tempat laser scanning melakukan pemindaian
- Sintesis : penyatuan gagasan, ide yang berbeda-beda kedalam keseluruhan yang lebih rumit
- Space capacity* : kapasitas ruang yang dapat digunakan untuk menampung sejumlah volume tertentu.
- Teodolit T2 : alat untuk mengukur sudut mendatar (horizontal) dan sudut tegak (vertical).dengan ketelitian satu detik
- (Theodolit Satu Sekon)
- Teodolit TO : alat untuk mengukur sudut mendatar (horizontal) dan sudut tegak (vertical).dengan ketelitian satu menit
- (Theodolit Satu Menit )
- Tie point* : titik ikat yang merupakan titik sekutu antar foto yang saling bertampalan.
- Transmisi budaya : meneruskan sesuatu dari satu pihak ke pihak lain
- Unmanned Aerial Vehicle ( UAV)* : wahana udara yang tak berawak, bisa diprogram untuk mengendalikan diri atau dikendalikan dari jarak jauh oleh pilot Biasanya dapat digunakan kembali dan mampu membawa muatan cukup berat (antara lain kamera atau senjata).
- Yasthi : Bagian puncak stupa yang menjadi batang tegak untuk menyangga payung atau cattrra, dan menjadi symbol tongkat Buddha Gautama.

## DAFTAR SINGKATAN

2D	: Dua Dimensi
3D	: Tiga Dimensi
ALS	: <i>Airborne Laser Scanning</i>
ALS	: <i>Airborne Laser Scanning</i>
AVI	: Audio Video Interleave
BIG	: Badan Informasi Geospasial
BKB	: Balai Konservasi Borobudur
CAD	: <i>Computer Aided Design</i>
CNC	: <i>Computer Numerical Control</i>
CP	: <i>Control Points</i>
CRF	: <i>Close Range Photogrammetry</i>
CRM	: <i>Cultural Resource Management</i>
DSLR	: <i>Digital Single Lens Refleks</i>
DSM	: <i>Digital Surface Models</i>
FL	: <i>Focal Length</i>
GCP	: <i>Ground Control Points</i>
GIS	: <i>Geographical Information System</i>
GPS	: <i>Global Positioning System</i>
GPS –RTK	: <i>Global Positioning System - Real Time Kinematik</i>
HIM	: <i>Heritage Information Modelling</i>
ICOMOS	: <i>International Council on Monuments and Sites</i>
IGN	: <i>Institut Geografi Nasional St Mande Prancis</i>
JICA	: <i>Japan International Cooperation Agency</i>
KSN	: <i>Kawasan Strategis Nasional</i>
LIDAR	: <i>Light Detection and Ranging</i>
LOD	: <i>Level Of Detail</i>
MOW	: <i>Memory of the World</i>
NO <sub>x</sub>	: Nitrogen oksida
OUV	: <i>Outstanding Universal Value</i>
OUV-AI	: <i>Outstanding Universal Value - Authenticity and Integrity</i>
PAP	: <i>Petra Archaeological Park</i>
PPCB	: <i>Proyek Pemugaran Candi Borobudur</i>
SDM	: <i>Sumber Daya Manusia</i>
SOC	: <i>State of Conservation</i>
SO <sub>x</sub>	: <i>Sulfur Oksida</i>
TAPURNAS	: <i>Taman Purbakala Nasional</i>
TLS	: <i>Terrestrial Laser Scanning</i>
UAV	: <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UNESCO	: <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
WHC	: <i>World Heritage Committee</i>