

DAFTAR ISI

HALAMAN NOMOR PERSOALAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AHIR.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
PERNYATAAN KEBENARAN DOKUMEN	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
INTISARI.....	xv
ABSTRACT	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	8
2.1 Sintesis Masalah dan <i>Positioning</i> Penelitian.....	8
2.2 Konsep <i>Digital Twin</i> Berbasis Fisika (<i>Physics-Based</i>).....	12
2.2.1 Definisi dan Evolusi Menuju <i>High-Fidelity</i>	12
2.2.2 Arsitektur Simulasi <i>Multibody Dynamics</i>	13
2.2.3 Mekanisme Interaksi Gaya pada Model Virtual.....	15
2.3 Karakteristik Kinematika dan Dinamika <i>Excavator</i>	17
2.3.1 Struktur Mekanis <i>Linkage</i>	17
2.3.2 Analisis Dinamika Beban pada <i>Boom</i>	18
2.3.3 Pengaruh Gravitasi dan Fenomena <i>Droop</i>	19
2.4 Sistem Antarmuka Teleoperasi (<i>Teleoperation Interface</i>).....	20
2.4.1 Prinsip Akuisisi Data (<i>Data Acquisition</i>).....	20

2.4.2	Mikrokontroler sebagai Unit Pemroses Sinyal.....	20
2.5	Sistem Kendali Umpan Balik (<i>Feedback Control</i>).....	22
2.5.1	Fenomena Osilasi dan <i>Hydraulic Spring Effect</i>	23
2.5.2	Arsitektur Kendali PID.....	23
2.5.3	Peran Fisik Komponen PID pada <i>Boom</i>	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		26
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	26
3.2	Tahapan Penelitian	28
3.2.1	Studi Literatur	28
3.2.2	Perancangan Sistem Simulator (<i>Digital Twin</i>).....	28
3.2.3	Integrasi Sistem (<i>System Integration</i>)	30
3.2.4	Skenario Pengujian.....	30
3.2.5	Analisis Hasil	32
3.3	Arsitektur Sistem	33
3.4	Perancangan Kendali PID.....	35
3.5	Alat dan Bahan Penelitian	36
3.5.1	Spesifikasi Teknis sebagai Parameter Simulasi	36
3.5.2	Perangkat Keras (<i>Hardware</i>).....	38
3.5.3	Perangkat Lunak (<i>Software</i>).....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		41
4.1	Pengujian Performa Transmisi Data Kendali Nirkabel	41
4.1.1	Karakteristik Sinyal <i>Joystick</i> dan Pengondisian <i>Deadband</i>	41
4.1.2	Hasil Pengujian Transmisi Serial (USB) sebagai <i>Baseline</i>	42
4.1.3	Hasil Pengujian Transmisi <i>Bluetooth Classic</i>	43
4.1.4	Hasil Pengujian WiFi <i>Infrastructure</i> (TCP/IP)	46
4.1.5	Hasil Pengujian WiFi <i>Point-to-Point</i> (UDP <i>SoftAP</i>)	47
4.1.6	Evaluasi Implementasi Protokol MQTT untuk Sistem IoT Industri	49
4.1.7	Evaluasi Komparatif dan Penentuan Protokol Optimal ..	50
4.2	Integrasi Jaringan dengan Model Kinematika Simscape.....	52
4.2.1	Sinkronisasi Data Jaringan Nirkabel dengan <i>Solver</i> Simscape.....	52
4.2.2	Pemanfaatan Blok <i>Gain</i> dan <i>Integrator</i> pada Transformasi	

Sinyal.....	54
4.2.3 Analisis Kesesuaian Sudut Gerak Ekskavator terhadap Input <i>Joystick</i>	55
4.3 Pengujian Sistem Kendali PID Berbasis Transfer Function.....	58
4.3.1 Pemodelan Matematis Respons Aktuator Lengan	58
4.3.2 Pengujian Subsistem dan Penyetelan Parameter Kendali PID	61
4.3.3 Analisis Kestabilan Posisi dan Respons Sistem.....	62
4.4 Implementasi dan Uji Fungsional Simulator Ekskavator	65
4.4.1 Kalibrasi Sinyal Kendali terhadap Aktuator	66
4.4.2 Ekstraksi dan Validasi Batasan Ruang Gerak (Limit Kerja)	67
4.4.3 Evaluasi Kecepatan Respons (Cycle Time) Lengan	69
BAB V PENUTUP.....	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN.....	75