



PENGEMBANGAN APLIKASI SISTEM TERMAL BERBASIS WEBSITE UNTUK ANALISIS DAN DESAIN PARAMETER SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP DENGAN BAHAN BAKAR BIOMASSA

OFFIANDA KURNIAWAN



**TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Pengembangan Aplikasi Sistem Termal Berbasis Website untuk Analisis dan Desain Parameter Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Bahan Bakar Biomassa” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir Tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2025

Offianda Kurniawan
F1501231005

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

OFFIANDA KURNIAWAN. Pengembangan Aplikasi Sistem Termal Berbasis *Website* untuk Analisis dan Desain Parameter Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Bahan Bakar Biomassa. Dibimbing oleh MUHAMAD YULIANTO dan MOHAMAD SOLAHUDIN.

Proses *prototyping* sistem pembangkit listrik secara fisik membutuhkan waktu dan biaya relatif besar. Adopsi konsep *digital twin technology* menjadi solusi yang ditawarkan sebagai upaya untuk mengefisienkan waktu dan biaya *prototyping*. Konsep *digital twin technology* yang mengakomodir permodelan dan simulasi sistem mesin dapat menjamin kebutuhan pengujian telah dilaksanakan sebelum tahap pembangunan fisik. Pengembangan aplikasi bernama ThePOCI diharapkan mengisi peranan komponen virtual dan komponen data dalam kerangka *digital twin technology* untuk keperluan permodelan, simulasi sistem, dan pengelolaan data hasil pengukuran dari sistem pembangkit listrik tenaga uap. Pengembangan aplikasi ThePOCI berbasis *website* dilengkapi dengan kemampuan perhitungan sistem pembakaran pada tungku khususnya bahan bakar biomassa, performansi pembangkit listrik tenaga uap, dan perhitungan emisi yang dihasilkan.

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus sampai Desember 2024 di Laboratorium Refrigerasi, Divisi Teknik Energi Terbarukan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University. Pengembangan aplikasi menggunakan metode *System Development Life Cycle* (SDLC). Pengujian aplikasi yang telah dikembangkan meliputi pengujian fungsional dengan metode *Blackbox*, pengujian kinerja sistem dengan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dari perbandingan hasil pengujian fisik pada sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) terhadap hasil perhitungan aplikasi, dan pengujian penggunaan sistem dengan metode *System Usability Scale* (SUS).

Aplikasi sistem termal untuk kebutuhan analisis dan desain parameter sistem pembangkit listrik tenaga uap dengan bahan bakar biomassa telah dikembangkan dengan dua modul utama yaitu modul *Steam Power Plant Design* dan *Combustion Analysis* yang memiliki fungsi masing-masing. Validasi aplikasi terhadap hasil eksperimental memperlihatkan modul *Combustion Analysis* memiliki MAPE terbesar pada model berbasis termal dengan input persentase kehilangan energi untuk variabel suhu *flue gas*, suhu fluida kerja keluar *boiler*, dan daya turbin masing masing sebesar 12,21%, 13,76%, dan 3,74% yang berada pada kategori baik. Validasi modul *Steam Power Plant Design* menghasilkan nilai MAPE untuk kondisi operasi ideal dan aktual masing-masing 2,22% dan 0,88% yang berada pada kategori sangat baik. Studi parameter menghasilkan potensi penggunaan refrigeran R1243zf dengan bahan bakar kaliandra dengan efisiensi termal tertinggi sebesar 4,01% dan emisi terendah sebesar 2011,97 kgCO₂e/kW. Hasil pengujian pada pengguna menghasilkan skor SUS 62,75 yaitu *acceptability ranges* dengan predikat *marginally acceptable*, *Quartil range* kategori 2, dan *Adjective rating* pada rentang *oke*.

Kata kunci: Aplikasi berbasis *Website*, *Digital Twin Technology*, *Organic Rankine Cycle*, Pembangkit Listrik Tenaga Uap, ThePOCI.

SUMMARY

OFFIANDA KURNIAWAN. Development of *Website-Based Thermal System Application for Analysis and Design Parameters of Steam Power Plant Systems using Biomass Fuel*. Supervised by MUHAMAD YULIANTO and MOHAMAD SOLAHUDIN.

The process of prototyping a power plant system is timely and costly. The adoption of digital twin technology is a solution offered as an effort to streamline prototyping time and costs. The concept of digital twin technology that accommodates the modelling and simulation of machine systems can ensure that testing needs have been implemented before the physical development stage. The development of an application called ThePOCI is expected to fill the role of a virtual component and a data component in the framework of digital twin technology for modelling, system simulation, and data management of measurement results from steam power plant systems. The development of the website-based ThePOCI application is equipped to calculate the combustion system in the furnace especially biomass fuel, performance of steam power plants, and the emissions calculated.

This research was carried out from August to December 2024 at the Refrigeration Laboratory, Renewable Energy Engineering Division, Department of Mechanical and Biosystem Engineering, IPB University. Application development uses the System Development Life Cycle (SDLC) method. The application tests that have been developed include functional testing using the Blackbox method, system performance testing using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) method from the comparison of physical test results on the Organic Rankine Cycle (ORC) system to the application calculation results, and system usage testing using the System Usability Scale (SUS) method.

The application of thermal systems for the needs of analysis and parameter design of steam power plant systems with biomass fuel has been developed with two main modules, namely the Steam Power Plant Design and Combustion Analysis modules, which have their respective functions. Application validation of the experimental results showed that the Combustion Analysis module had the largest MAPE in thermal-based models with input of energy loss percentage for the variables of flue gas temperature, *boiler* outlet fluid temperature, and turbine power of 12.21%, 13.76%, and 3.74%, respectively, which were in the good category. The validation of the Steam Power Plant Design module resulted in MAPE values for ideal and actual operating conditions of 2.22% and 0.88%, respectively, which are in the excellent category. The parameter study resulted in the potential use of R1243zf refrigerant with kaliandra fuel with the highest thermal efficiency of 4.01% and the lowest emission of 2011.97 kgCO₂e/kW. The test results on the user resulted in an SUS score of 62.75, namely acceptability ranges with the predicate of marginally acceptable, Quartil range category 2, and Adjective rating in the okay range.

Keywords: Digital twin technology, Organic Rankine Cycle, Steam Power Plant, ThePOCI, Website-based applications.



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



PENGEMBANGAN APLIKASI SISTEM TERMAL BERBASIS WEBSITE UNTUK ANALISIS DAN DESAIN PARAMETER SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP DENGAN BAHAN BAKAR BIOMASSA

OFFIANDA KURNIAWAN

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik pada
Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem

**TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Judul Tesis : Pengembangan Aplikasi Sistem Termal Berbasis *Website* untuk Analisis dan Desain Parameter Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Bahan Bakar Biomassa

Nama : Offianda Kurniawan
NIM : F1501231005

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Muhamad Yulianto, S.T., M.T.



Pembimbing 2:
Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr.
NIP 19620803 198703 1 002



Dekan Fakultas Teknologi Pertanian:
Prof. Dr. Ir. Slamet Budjianto, M.Agr.
NIP 19610502 198603 1 002



Tanggal Ujian: 24 Juli 2025

Tanggal Lulus:



- 

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga Tesis ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Agustus 2024 sampai bulan Desember 2024 ini ialah Energi Terbarukan, dengan judul “Pengembangan Aplikasi Sistem Termal Berbasis Website untuk Analisis dan Desain Parameter Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Bahan Bakar Biomassa”.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian tesis:

1. Bapak Dr. Ir. Edy Hartulistiyo, M.Sc. Agr. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem IPB.
2. Bapak Dr. Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr. selaku Ketua program studi Teknik Pertanian dan Biosistem IPB.
3. Bapak Dr. Muhamad Yulianto, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing I atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
4. Bapak Dr. Ir. Mohamad Solahudin, M.Si sebagai Dosen Pembimbing II atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
5. Ibu Dr. Ir. Dyah Wulandani, M.Si. sebagai Dosen Penguji Tesis dan Bapak Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.T.P., M.Si., sebagai Dosen Penguji Kolokium atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
6. Ibu Dr. Lenny Saulia, S.T.P., M.Si., selaku moderator pada kolokium dan ujian tesis, Ibu Prof. Dr. Ir. Tineke Mandang, M.S. sebagai dosen seminar atas arahan dan bimbingan yang diberikan.
7. Pihak-pihak yang telah membantu menyelesaikan tesis ini: Osaka Foundation, Hutan Penelitian Gunung Walat, Laboratorium Refrigerasi, Laboratorium Teknik Energi Terbarukan, Laboratorium Teknik Bioinformatika, dan Staff Departemen Teknik Mesin dan Biosistem
8. Kepada keluarga penulis, Ayah Yuyud Wahyudi, Ibu Helli Nirwana, dan adik Puji Lestari yang selalu mendukung penulis baik secara moral maupun materiil.
9. Rekan satu tim penelitian Ratu Yanra Dewi, M. Arief Yahdi, Haris Mawardi, dan Lalu Muh Fathul Aziz Al Azhari yang telah bersedia bekerja sama.
10. Teman-teman Prodi Magister Teknik Pertanian dan Biosistem angkatan 60 yang sudah turut memotivasi dan menemani penulis selama menyelesaikan tesis.
11. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penelitian dan penyelesaian tesis.

Semoga tesis ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2025

Offianda Kurniawan



- 

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap	4
2.2 <i>Organic Rankine Cycle (ORC)</i>	4
2.3 Komponen Sistem ORC	6
2.4 Fluida Kerja	10
2.5 Sumber Energi	11
2.6 <i>Analisis Life Cycle Climate Performance (LCCP)</i>	12
2.7 Software NIST REFPROP	13
2.8 <i>Digital Twin Technology</i>	13
2.9 Aplikasi Berbasis <i>Website</i>	14
2.10 Pengembangan Model Sistem	15
III METODE	18
3.1 Waktu dan Tempat	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.3 Metode Penelitian	18
3.4 Eksperimental <i>Setup</i>	19
3.5 Investigasi Sistem	21
3.6 Analisis Sistem	21
3.7 Desain Sistem	30
3.8 Implementasi Sistem	32
3.9 Pengujian Sistem	32
3.10 Pemeliharaan	34
3.11 Analisis Ketidakpastian	34
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Investigasi Sistem	36
4.2 Analisis Sistem	36
4.3 Desain Sistem	37
4.4 Implementasi Sistem	39
4.5 Pengujian Sistem	50
4.6 Studi Parameter	58
4.7 <i>Analisis Life Cycle Climate Performance (LCCP)</i>	60
4.8 Pengujian Aplikasi pada Pengguna	61
V SIMPULAN DAN SARAN	62



@Hak cipta milik IPB University

5.1	Simpulan	62
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		70
RIWAYAT HIDUP		91

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Karakteristik fluida kerja	10
2	Karakteristik sumber energi biomassa	12
3	pengelompokan model	15
4	Matriks validasi	32
5	Kinerja sistem berdasarkan klasifikasi nilai MAPE	33
6	Ketidakpastian alat ukur yang digunakan pada pengujian	34
7	Ketidakpastian variabel validasi	35
8	Hasil pengujian fungsional aplikasi dengan metode <i>blackbox</i>	51
9	Validasi aplikasi ThePOCI parameter suhu <i>flue gas</i>	54
10	Validasi aplikasi ThePOCI parameter suhu fluida kerja keluar <i>boiler</i>	56
11	Validasi aplikasi ThePOCI parameter daya turbin	57
12	Hasil validasi untuk modul <i>Steam Power Plant Design</i>	58

DAFTAR GAMBAR

1	Skema komponen pembangkit listrik tenaga uap berdasarkan siklus rankine ideal (Cengel dan Boles 2015)	4
2	Grafik hubungan tekanan dan entalpi pada sistem <i>organic rankine cycle</i> ideal (Gangar <i>et al.</i> 2020)	5
3	Skema ORC dengan tungku biomassa: sisi tungku (merah), sisi ORC (Biru) (Calli <i>et al.</i> 2018)	5
4	Skema tungku pembakaran (Koraïem dan Assanis 2021)	6
5	Skema sistem pompa (Soekardi 2015)	7
6	Skema sistem <i>boiler</i> (Soekardi 2015)	8
7	Skema sistem turbin uap (Soekardi 2015)	9
8	Skema sistem kondensor (Soekardi 2015)	9
9	Parameter penyusun analisis LCCP (IIR 2015)	12
10	Diagram Alir Penelitian	18
11	Diagram alir pengembangan aplikasi sistem termal dengan metode <i>Software Development Life Cycle</i> (SDLC) (modifikasi dari O'Brien dan Marakas 2010)	19
12	Eksperimental setup sistem pembangkit listrik tenaga uap ORC integrasi dengan komponen tungku pembakaran: (a) <i>Piping</i> diagram sistem, (b) Gambar fisik sistem ORC.	20
13	Diagram alir perhitungan untuk modul <i>Combustion Analysis</i>	21
14	Diagram alir perhitungan untuk modul <i>Steam Power Plant Design</i>	22
15	Diagram alir perhitungan optimasi suhu fluida kerja keluar <i>boiler</i> dengan metode substitusi suksesif	28
16	Diagram alir penggunaan aplikasi ThePOCI	31
17	Tingkat penerimaan pengguna skor menurut SUS (Bangor <i>et al.</i> 2008)	34



18	User use case diagram pengguna aplikasi ThePOCI	37
19	User activity diagram pengguna di dalam aplikasi ThePOCI	38
20	Halaman utama aplikasi: (a) Halaman <i>login</i> , (b) Halaman <i>Sign up</i>	39
21	Halaman <i>Home</i> aplikasi ThePOCI	39
22	Halaman utama modul <i>Steam Power Plant Design</i>	40
23	Halaman input komponen kondisi operasi aktual: (a) pompa, (b) <i>boiler</i>	40
24	Halaman input komponen untuk kondisi operasi aktual: (a) turbin, (b) kondensor.	41
25	Halaman form input parameter komponen pada modul <i>Steam Power Plant Design</i> untuk kondisi operasi ideal: (a) pompa, (b) <i>boiler</i> , (c) turbin, (d) kondensor.	41
26	Halaman modul <i>Combustion Analysis</i> : (a) Halaman menu utama, (b) Halaman input berbasis termal.	42
27	Halaman input parameter untuk analisis kehilangan energi melalui dinding tungku	43
28	Halaman <i>combustion properties</i> untuk menampilkan hasil analisis perhitungan sistem tungku pembakaran	44
29	Halaman modul <i>Combustion Analysis</i> untuk perhitungan berbasis material: (a) Metode berbasis material input persentase losses energi tungku, (b) Metode berbasis material input suhu dinding tungku	45
30	Halaman <i>enthalpy analysis</i> untuk input data entalpi pembakaran	46
31	Halaman <i>combustion properties</i> untuk menampilkan hasil modul <i>combustion analysis</i> untuk perhitungan berbasis material	47
32	Halaman <i>Ideal Rankine Cycle</i> untuk analisis sistem pembangkit listrik tenaga uap	47
33	Halaman input komponen <i>boiler</i> untuk analisis sistem pembangkit listrik tenaga uap yang terintegrasi dengan sistem pembakaran	48
34	Tampilan halaman input komponen turbin dan kondensor untuk analisis sistem pembangkit listrik tenaga uap yang terintegrasi dengan sistem pembakaran: (a) Turbin, (b) Kondensor.	49
35	Halaman input parameter untuk analisis beban emisi sistem dengan metode <i>Life Cycle Climate Performance</i>	50
36	Profile suhu <i>flue gas</i> dan fluida kerja keluar <i>boiler</i> : (a) Bahan bakar kaliandra. (b) Bahan bakar gamal, (c) bahan bakar sengan	52
37	Analisis error hasil simulasi perhitungan suhu <i>flue gas</i> menggunakan aplikasi ThePOCI terhadap hasil pengujian: (a) Model berbasis termal, (b) Model berbasis material dengan input persentase <i>losses</i> , dan (c) Model berbasis material dengan input <i>losses</i> dinding tungku	53
38	Analisis error perhitungan suhu keluar <i>boiler</i> menggunakan aplikasi ThePOCI terhadap hasil pengujian: (a) Model basis termal, (b) Model berbasis material dengan input persentase <i>losses</i> , dan (c) Model berbasis material dengan input <i>losses</i> dinding tungku	55
39	Analisis error hasil simulasi perhitungan daya turbin menggunakan aplikasi ThePOCI terhadap hasil pengujian: (a) Model berbasis termal, (b) Model berbasis material dengan input persentase <i>losses</i> , dan (c) Model berbasis material dengan input <i>losses</i> dinding tungku	56
40	Efisiensi termal ORC dengan variasi fluida kerja dan jenis bahan bakar: (a) bahan bakar kaliandra, (b) bakar gamal, (c) bahan bakar sengan.	59

41	Hasil perhitungan emisi PLTU berbasis ORC dengan metode LCCP menggunakan aplikasi ThePOCI: (a) emisi dengan bahan bakar kaliandra, (b) emisi dengan bahan bakar gamal, (c) emisi dengan bahan bakar sengon	60
42	Nilai SUS hasil pengujian pada pengguna	61

DAFTAR LAMPIRAN

1	Lampiran 1 Penulisan script aplikasi berbasis <i>website</i>	71
2	Lampiran 2 Data input simulasi untuk pengujian kinerja aplikasi ThePOCI	73
3	Lampiran 3 Kuisisioner <i>System Usability Scale</i>	77
4	Lampiran 4 <i>Entity Relationship Diagram</i> dari <i>Database</i> aplikasi ThePOCI	78
5	Lampiran 5 <i>Sequence diagram</i> Aplikasi ThePOCI	79
6	Lampiran 6 Hasil perhitungan aplikasi ThePOCI	83
7	Lampiran 7 hasil studi parameter	84
8	Lampiran 8 P-h diagram hasil studi parameter	87
9	Lampiran 9 Data Analisis <i>Life Cycle Climate Performance</i> (LCCP) sistem ORC	89
10	Lampiran 10 Hasil uji SUS	90