

**PERANCANGAN SISTEM OPERASI *SUPERCRITICAL*
WATER OXIDATION (SCWO) UNTUK PENGOLAHAN
LIMBAH B3**

PENELITIAN TESIS



NAMA : Angela Justina Kumalaputri

NRP : 2009871001

DOSEN PEMBIMBING :

Dr. Tedi Hudaya, ST., M.EngSc

Dr. Henky Muljana, ST., M.Eng

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK KIMIA
KONSENTRASI TEKNOLOGI PANGAN
BANDUNG
2011**

**PERANCANGAN SISTEM OPERASI *SUPERCritical*
Water Oxidation (SCWO) UNTUK PENGOLAHAN
LIMBAH B3**

ANGELA JUSTINA KUMALAPUTRI 2009871001

PERSETUJUAN PENELITIAN TESIS

Penguji merangkap Pembimbing

Penguji merangkap Ko Pembimbing

Dr. Tedi Hudaya, ST., M.EngSc

Dr. Henky Muljana, ST., M.Eng

Penguji

Penguji

Dr. Budihusodo Bisowarno

Dr. Asaf Kleopas Sugih

PERNYATAAN

Yang bertandatangan di bawah ini, saya dengan data diri sebagai berikut:

Nama : **Angela Justina Kumalaputri**
Nomor Pokok Mahasiswa : **2009871001**
Program Studi : **Magister Teknik Kimia**
Program Pasca Sarjana
Universitas Katolik Parahyangan

menyatakan bahwa Tesis dengan judul:

Perancangan Sistem Operasi *Supercritical Water Oxidation* (SCWO) untuk Pengolahan Limbah B3

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan Pembimbing dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya atau jika ada tuntutan formal atau non formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan: di Bandung

Tanggal: 1 Agustus 2011

Angela Justina Kumalaputri

ABSTRAK

Seiring dengan makin bertambahnya industri, permasalahan limbah yang menyertainya semakin bertambah. Sementara, pengolahan limbah yang umum digunakan saat ini memiliki keterbatasan jika digunakan untuk mengolah limbah *non biodegradable*. Dari keunggulannya yang dapat mendestruksi limbah *non biodegradable* berkonsentrasi tinggi dengan nilai Destruksi Efisiensi (DE) mencapai > 99% dalam waktu singkat, maka dipilih teknologi *Supercritical Water Oxidation* (SCWO). Namun teknologi ini memiliki permasalahan yaitu korosi, *plugging*, dan boros energi. Penelitian ini berfokus pada perancangan keseluruhan sistem operasi SCWO (berikut proses pendukung untuk mengatasi permasalahan tersebut) dengan memberikan pertimbangan desain operasi, pemilihan material, kontrol, keamanan, serta meningkatkan keekonomisan proses melalui integrasi energi.

Kondisi operasi yang dipilih yaitu temperatur 500°C, tekanan 23 MPa, serta oksidan berupa 200 % oksigen berlebih. Proses dimulai dengan memberikan perlakuan awal pada air limbah berupa filtrasi fisik dan proses demineralisasi untuk menghilangkan partikulat dan garam pada limbah. Air limbah ditekan (2 turbin pompa) baru dipanaskan (2 HE), berselang-seling. Oksidan berupa oksigen berasal dari udara yang dimurnikan melalui proses *Pressure Swing Adsorption* (PSA). O₂ ditekan menggunakan 2 kompresor multi tahap dengan *intercooler*. Integrasi panas terjadi pada HE sementara integrasi kerja terjadi pada turbin pompa. Konfigurasi reaktor yang dipilih adalah SUWOX 6 (material *inner vessel* berupa keramik dan material *outer vessel* berupa SS 316). Kontrol yang digunakan adalah temperatur, laju alir, dan ketinggian. Pertimbangan keamanan yang dilakukan berupa keamanan desain (alat, proses, kontrol, bangunan), keamanan teknis, inspeksi dan pemeliharaan secara berkala, dan pelatihan karyawan. Hasil akhir dari penelitian ini juga meliputi *process flow sheet diagram* dengan mencantumkan pengontrolan, juga kondisi operasi di tiap-tiap titik.

ABSTRACT

With increasing the number of industry, the waste problematic that follow also increase. Until now, the waste treatment that generally used have limitation to treat non biodegradable waste. With its superior characteristic that can destroy the high concentrate of the non biodegradable waste with high DE (>99%) at the small time, this thesis choose Supercritical Water Oxidation (SCWO) technology. But, it have any problems like corrosion, plugging, and high energy. This thesis foccus on the synthesis of the overall SCWO operation system (include the support process) that give the design, material chosing, control, safety, also economics consideration (through heat and energy integration).

The operating condition that has been chosen: 500°C, 23 MPa, and 200 % excess of oxygen. The process started with filtration and demineralitation to the waste water to remove the particulat and salt. Waste water is compressed (2 turbine pumps) and heated (2 HE). Oksidant that used is oxygen that origaniated from air that have been purified through Pressure Swing Adsorption (PSA). O₂ is compressed through 2 of multi stage compressor with intercooler. Heat integration take a place in HE and the work integration in turbine pump. SUWOX 6 has been chosen as the best reactor configuration. (ceramics as inner vessel material and SS 316 as outer vessel material). Controls that used are temperature, flow rate, and level. Safety consideration that given are design safety (equipment, process, control, building), operational safety, inspection, maintenance, and training. The final results from the thesis are process flow sheet diagram with the controller and operating condition in each point.

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus yang telah menuntun dan memberkati penulis dalam penyusunan tesis ini. Bukan karena kuat dan gagah penulis, namun hanya karena kasih karuniaNya penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Tesis desain ini disusun untuk memenuhi ujian kelulusan S2 Magister Teknik Kimia konsentrasi Teknologi Pangan Universitas Katolik Parahyangan. Tesis ini dibuat berdasarkan pengamatan mengenai perkembangan teknologi *Supercritical Water Oxidation* (SCWO) untuk pengolahan limbah B3. Dibutuhkan sebuah rancangan yang terintegrasi antara setiap unit operasi di dalam system operasi SCWO tersebut dalam memenuhi tuntutan untuk dapat memperbaiki kinerjanya.

Penulis menyadari bahwa masih ada banyak kekurangan dalam tesis ini. Oleh karena itu penulis dengan senang hati menerima kritik maupun saran untuk menyempurnakan tesis ini. Dalam penyusunan tesis ini tidak terlepas dari keterlibatan banyak pihak yang telah membantu, baik dalam pengumpulan literature maupun diskusi-diskusi dalam memberikan masukan-masukan sehingga tesis ini akhirnya dapat diselesaikan. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak **Dr. Tedi Hudaya, ST., MEngSc** dan Bapak **Dr. Henky Muljana, ST., M.Eng** selaku dosen pembimbing yang sangat membantu dalam membimbing penulis selama penyusunan tesis ini, baik secara pengetahuan maupun secara moral. Terima kasih atas waktu yang sangat banyak diluangkan untuk membantu dan meng-*improve* penulis, juga atas bantuannya dalam memberikan jurnal.
2. Bpk. **Prof Dr. Ign Suharto Ir., APU**, Bpk. **Paulus Sukpto**, Ibu **Juddy Retti Witono**, Ibu **Susiana Prasetyo**, Ibu **Anastasia Prima Kristiaji** yang

banyak memberikan dorongan agar penulis dapat segera menyelesaikan tesis ini.

3. Ibu **Ratna Frida Susanti** yang telah memberikan bantuan literatur dan jurnal dalam penyusunan tesis ini.
4. **Mami, Ooh Toni dan Engso Maria, Ciahu William dan Cici Anne, Patricia, Farrel, Vania, Nathan, dan Ben** yang memberikan dorongan yang tidak putus-putusnya kepada penulis..
5. Pemurid sekaligus bapa rohani, **Pst. Cahya Adi Candra & Pst. Ola**, atas doa, bimbingan, nasehat dan teguran yang sangat membangun penulis..
6. **Cella, ci Bene, ko Benny, ci Lucy** yang telah banyak men-*support* di saat penulis merasa *stag*, juga banyak mendukung dalam doa. Terima kasih untuk persahabatan yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
7. Seluruh keluarga rohani **DG Nard (Fenny dan Dhytha); LG Efata Nard (Linda, Yola, Yulike, Lucy, Sally, Devina, Erlina, Evelyn, Jessica, Nova, Renna, Demi, Felisia, Ester, dan Sisca); LG Hamamsiah (Freddy dan Pascal), ex DG efata (ci Moo, Jeni, Tiya, ci Devi, ci Frieska, Cei, Tiya, Betsy, Grace, Nita, Gabi);** mantan partner leader (**Panus dan Bona**), **dr. Friska** dan seluruh tim **pendoa syafaat**, serta **g'comers**, atas setiap doa dan dukungannya.
8. Ko **Lukman Tanzil** dan **Dian 'ayam'** untuk bantuannya menerjemahkan jurnal berbahasa Jerman yang sangat penulis butuhkan.
9. **Ci Merla** dan **Vania**, yang bersama-sama berjuang, terimakasih buat kebersamaannya 'ngautis bikin tesis'.
10. Teman-teman seperjuangan dalam Magister Teknik Kimia 2009: Bpk **Toni Handoko, Pandega, Hana, Martin, kak Ninil, dan Yulia** untuk semua diskusi, masukan, dan juga atas kebersamaan dan kerjasamanya selama 1,5 tahun terakhir.
11. **Detha, Linda, Monika Y., Cecil, Elsa, dan Vania** selaku teman penulis semasa S1 yang terus men-*support* penulis terutama di saat penulis menyelesaikan tesis.

12. **Hanny, Maria & James, Anas** selaku teman kecil penulis yang terus *men-support* penulis.
13. **Hans Kristianto, Friska G.M., Heydilia, Jaya, Teddy, Monica,** dan **Imel**, serta para (mantan) mahasiswa/i penulis yang banyak *men-suport* penulis untuk menyelesaikan tesis ini.
14. Rekan-rekan kerja di Edlink, **ci Vivin, mba Carol, Yenny, ci Lenny, ci Eli, Sule, Dita, Ike, Levi, Yovita, Valerie,** dan **Mega** untuk waktu bekerja yang singkat dengan penulis tapi memberikan kesan tersendiri.
15. Terakhir kepada semua pihak yang selalu membantu penulis dalam penyusunan tesis ini.

Bandung, Agustus 2011

Penulis

Angela Justina Kumalaputri

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
PRAKATA	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Rumusan Permasalahan	3
1.3.Tujuan Penelitian	3
1.4.Kerangka Penelitian	4
1.5.Ruang Lingkup Penelitian	5
BAB II TINJAUAN LITERATUR.....	6
2.1.Pengolahan Limbah Berbahaya dan Beracun (B3)	11
2.2.Teknologi Fluida Superkritik	14
2.2.1 <i>Supercritical Fluids/SCF</i> atau Fluida Superkritik.....	14
2.2.2 <i>Supercritical Water Oxidation</i>	16
2.2.3 Perkembangan dan Masalah yang Dihadapi pada Proses SCWO	21
2.2.4 Parameter Operasi dalam Proses SCWO	24
2.2.5 Degradasi Limbah Berbahaya dengan SCWO	29
2.3.Desain Reaktor SCWO untuk Pengolahan Limbah	32

2.3.1	Konfigurasi Reaktor.....	37
2.3.2	Teknik Operasi dalam SCWO	52
2.3.3	Pemilihan Material.....	58
2.4.	Penelitian-Penelitian SCWO untuk Pengolahan Limbah.....	68
2.4.1	Penelitian SCWO untuk Limbah Cair Industri yang Mengandung <i>Biocide</i>	69
2.4.2	Pengolahan Limbah untuk Kontaminasi PCB	70
2.5.	Aplikasi Komersial dari Reaktor SCWO untuk Pengolahan Limbah	73
2.6.	Pertimbangan Keamanan	75
2.6.1	Desain	76
2.6.2	Perubahan Karakteristik pada Temperatur dan Tekanan Tinggi	76
2.6.3	Desain Proteksi dan Konstruksi.....	77
2.6.4	Desain Pabrik.....	77
2.6.5	Operasi.....	78
2.6.6	Prosedur <i>Testing</i> dan Inspeksi	80
2.7.	Pembahasan Laporan Hasil Penelitian	80
BAB III METODE PENELITIAN		82
3.1.	Proses dan Kondisi Operasi yang Dipilih	83
3.1.1	Penyediaan Oksidan	84
3.1.2	Kompresi dan Ekspansi.....	85
3.1.3	Pemanasan dan Pendinginan	86
3.1.4	Perlakuan Awal Limbah.....	87
3.1.5	Konfigurasi Reaktor Utama	89
3.1.6	Ekspansi	92
3.1.7	Pendinginan.....	92
3.1.8	Separator Gas Cair	92
3.2.	Pemilihan Material	92
3.3.	Sistem Kontrol	93

3.3.1	Kontrol Ketinggian	93
3.3.2	Kontrol Tekanan	93
3.3.3	Kontrol Laju Alir	93
3.3.4	Kontrol Temperatur	93
3.4	Jadwal Kerja Penelitian	94
BAB IV HASIL PENELITIAN.....		95
4.1.	Sintesa Proses	95
4.2.	Pertimbangan Teknis	97
4.2.1	Kondisi Operasi.....	97
4.2.2	Desain Unit Operasi Utama	100
4.2.3	Pemilihan Material	114
4.2.4	Desain Unit Transportasi Fluida (Sistem Perpipaan)	116
4.2.5	Desain Kontroler	117
4.3.	Pertimbangan Keamanan	119
4.4.	<i>Process Flow Sheet Diagram</i>	123
BAB V KESIMPULAN		124
DAFTAR PUSTAKA		126
LAMPIRAN A		A-1

DAFTAR GAMBAR

1.1 Kerangka penelitian	4
2.1 Teknologi pengolahan berdasarkan konsentrasi polutan	8
2.2 Diagram fasa	15
2.3 Pengaruh T terhadap beberapa karakteristik air pada P=1 atm.....	19
2.4 Skema reaksi komponen organik pada SCWO	31
2.5 Reaktor di dalam <i>split furnace</i>	38
2.6 <i>Isothermal fluidized sand bath reactor</i>	38
2.7 <i>Transpiring Wall Reactor</i>	40
2.8 TWR dengan <i>quenching cooler</i> dan separator garam	43
2.9 TWR dengan <i>flame hydrothermal</i>	44
2.10 SUWOX 4	48
2.11 SUWOX 5a	49
2.12 SUWOX 5b	49
2.13 SUWOX 5c	50
2.14 SUWOX 6	52
2.15 Separator garam	54
3.1 Unit proses keseluruhan	83
3.2 Kompresi dan ekspansi	86
3.3 <i>Heat Exchanger</i>	87
3.4 Kolom penukar ion.....	88
3.5 Reaktor SCWO	90
3.6 <i>Jet mixer</i>	90
3.7 <i>Jet loop mixer</i>	91
4.1 Kolom penukar ion	103
4.2 <i>Pressure Swing Adsorption (PSA)</i>	104
4.3 Turbin pompa	105

4.4	Kompresor berikut kondisi P,Tnya	106
4.5	Rancangan kompresor multistage dan <i>intercooler</i>	106
4.6	Kompresor multistage dan <i>intercooler</i>	107
4.7	Kurva komposit	108
4.8	<i>Plate Circuit Heat Exchanger</i> (PCHE)	109
4.9	SUWOX 6	114
A.1	Rancangan awal konfigurasi kompresor	A-1
A.2	Konfigurasi kompresor multistage	A-2
A.3	Tahap I kompresor multistage I	A-2
A.4	Tahap II kompresor multistage I	A-3
A.5	Tahap III kompresor multistage I	A-5
A.6	Tahap I kompresor multistage II	A-6
A.7	Tahap II kompresor multistage II	A-7
A.78	Tahap III kompresor multistage II	A-8

DAFTAR TABEL

2.1 Sejarah teknologi pengolahan dan kasus-kasus pencemaran limbah VOCs dan SVOCs.....	7
2.2 Perbandingan beberapa teknologi pengolahan limbah PCB	10
2.3 Kondisi kritik beberapa jenis pelarut	16
2.4 Sejarah perkembangan SCWO	17
2.5 Properti air pada kondisi superkritik	20
2.6 Aplikasi SCWO pada berbagai jenis limbah.....	23
2.7 Parameter-parameter SCWO untuk beberapa jenis limbah	23
2.8 Data performansi SCWO	26
2.9 Reaksi oksidasi dalam SCWO	33
2.10 Pendekatan pengontrolan korosi dalam SCWO.....	33
2.11 Material liner pada SCWO.....	42
2.12 Kekuatan Mekanik pada T ruang	59
2.13 <i>Fabrication, forming, welding, dan casting</i>	62
2.14 Harga dasar metal.....	63
2.15 <i>Relatives cost rating</i> untuk logam.....	64
2.16 Perbandingan beberapa material terhadap tingkat korosivitasnya	65
2.17 Tingkatan austenitic <i>stainless steel</i> yang umum dipakai	65
2.18 <i>Ranking</i> peningkatan resistansi <i>stainless steel</i>	67
2.19 Penelitian-penelitian dengan berbagai jenis limbah cair industri	68
2.20 Hasil penelitian pengolahan limbah <i>biocide</i> dengan reaktor SCWO.....	69
2.21 Pengolahan limbah beberapa industri dengan SCWO	74
2.22 Desain SCWO komersial pada beberapa perusahaan	75
4.1 Data aliran turbin pompa	104
4.2 Data aliran kompresor	105
4.3 Data aliran kompresor multistage dan <i>intercooler</i>	107

4.4 Data aliran HE108

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan semakin berkembangnya dunia industri (terutama setelah revolusi industri), kebutuhan di dalam pengolahan limbah, khususnya limbah industri kimia menjadi semakin besar. Limbah yang dihasilkan dari industri proses tersebut perlu dikelola dengan baik agar tidak membahayakan lingkungan sekitar dimana limbah tersebut dibuang. Berikut ini adalah beberapa kasus pencemaran, baik yang terjadi di Indonesia, maupun di dunia internasional:

1. Pada tahun 1947 perusahaan plastik dan bahan kimia Hooker membeli tanah di Love Cannal, New York yang akan diperuntukkan sebagai *landfill*. Pada awal 1950an, hampir 22.000 ton limbah, termasuk 248 jenis bahan kimia yang karsinogenik dan toksik (dioksin adalah salah satunya). *Landfill* tersebut ditutup dengan lapisan beton dan keramik tahan air untuk mencegah *leaching*. Setelah *landfill* ini ditutup, Niagara Falls Board of Education membeli tanah tersebut untuk didirikan sekolah. Saat pemerintah daerah mengkonstruksi pembangunan gedung sekolah, mereka menyingkirkan sebagian lapisan keramik. Saat musim hujan besar tahun 1970, permukaan tanah naik dan menyebabkan limbah *leaching* dan mengalir ke pemukiman penduduk. Limbah ini menimbulkan gangguan kesehatan yang sangat serius, di antaranya berat lahir yang sangat rendah serta kelainan kromosom. Pada tahun 1978, 238 penduduk direlokasi dan menerima kompensasi penuh. Permasalahan ini belum selesai sampai tahun 1998 (Seebauer Group, 2011; Tang, Walter Z., 2004).
2. Pada tahun 1956 tercatat terjadi tragedi Minamata di prefektur Kumamoto, Jepang yang disebabkan oleh pembuangan limbah metilmerkuri oleh Chisso Co., Ltd.

3. Gangguan kesehatan yang dijumpai yaitu kerusakan syaraf pada masyarakat sekitar yang mengkonsumsi ikan dan kerang dari Teluk Minamata dan Laut Shiranui. Gejala yang terjadi yaitu ataksia (kehilangan keseimbangan), *numbness* (mati rasa) pada tangan dan kaki, juga menyerang pada otot, mata, dan telinga, juga kematian janin dalam kandungan. Kematian kucing, anjing, babi, dan manusia berlanjut sampai lebih dari 30 tahun. Pada Maret 2001, didata terdapat sebanyak 2256 korban (1784 di antaranya sudah meninggal), dan lebih dari 10.000 jiwa mendapat kompensasi keuangan dari Chisso. Tahun 2004, Chisso membayar \$86 juta sebagai kompensasi dan berjanji akan membersihkan sisa kontaminasi. Pada 29 Maret 2010 didata bahwa sudah tidak diketemukan korban akibat polusi Minamata (Wikipedia, 2011).
4. Pencemaran Teluk Buyat terjadi pada Oktober 2004 akibat limbah industri pertambangan PT. Newmont Minahasa Raya (NMR). Pencemaran yang terjadi adalah pencemaran merkuri, di mana hasil uji darah penduduk yang menderita pneumonia menyatakan tingginya kadar merkuri dalam darah yang tidak dapat hilang seumur hidupnya, bahkan diperkirakan mencapai 10 generasi. Selain merkuri, ternyata ditemukan pula sianida, arsenik, cadmium, antimon, mangan, dan beberapa jenis logam berat lainnya (Sup, 2011; Powell, Sian, 2011).
5. Pada tanggal 11 Juni 2006, 144 orang warga Kampung Kramat, Cikarang menderita keracunan akibat pembuangan drum-drum bekas limbah B₃ oleh PT. Dong Woo Environmental Indonesia. Drum bekas tersebut antara lain mengandung amoniak, karbon monoksida, metana, dan nitrogen monoksida. Tanah di sekitar perusahaan menjadi berwarna hitam dan berbau (Anonim, 2011; Anwar, 2011).
6. Mei 2006 PT. Lapindo Brantas di Porong Sidoarjo mengalami kebocoran gas pada saat pengeboran sehingga menimbulkan banjir lumpur panas yang masih belum teratasi sampai saat ini (Wikipedia, 2011).

1.2 Rumusan Permasalahan

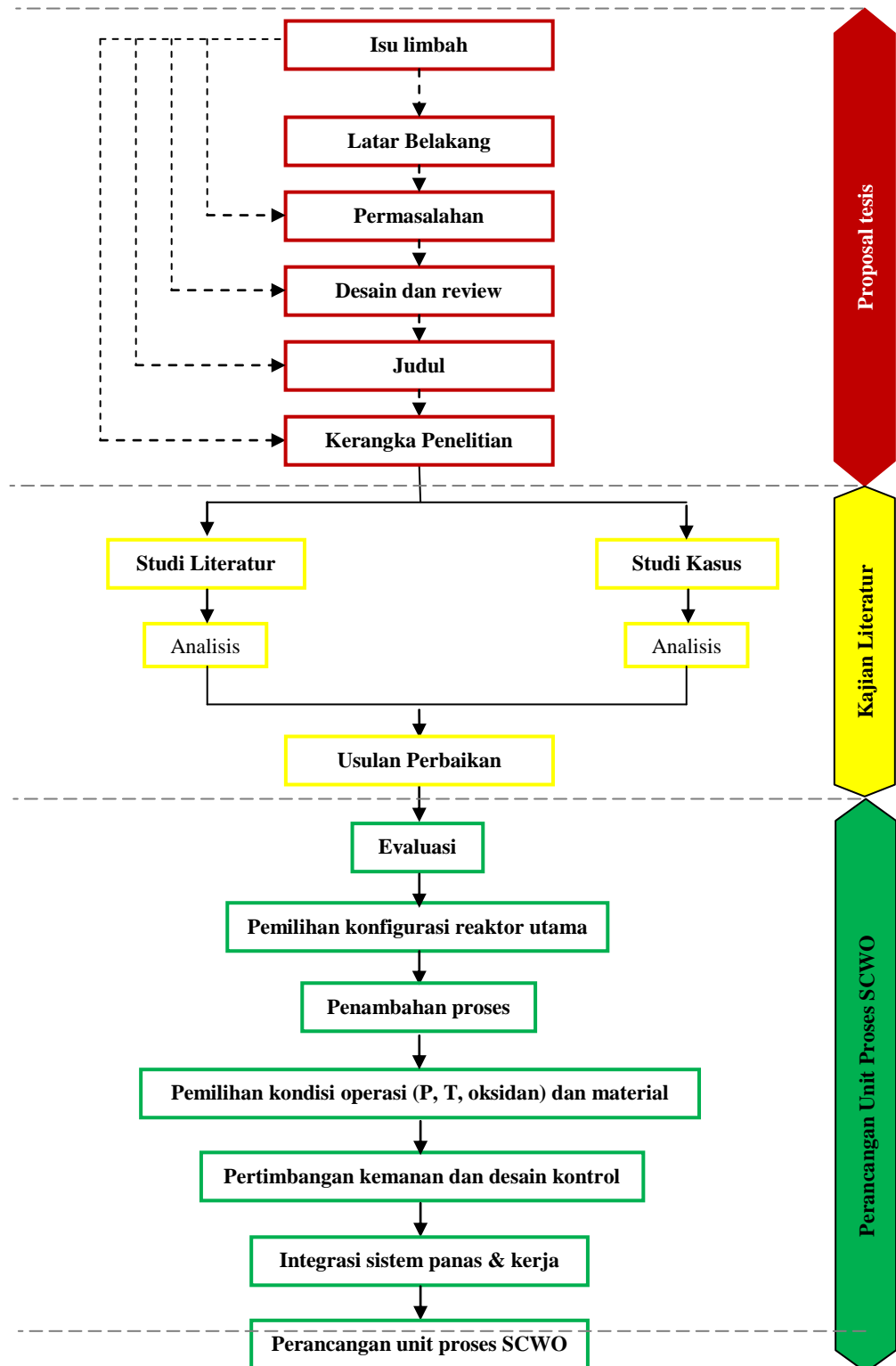
Dengan tingkat kesulitan limbah yang tidak dapat terdegradasi secara biologis atau disebut juga *non biodegradable/biorecalcitrant* untuk diolah, ditambah dengan keterbatasan kemampuan teknologi konvensional, pada umumnya limbah-limbah ini berakhir dengan insenerasi ataupun *landfill*. Kesulitan pun bertambah jika limbah yang diolah memiliki konsentrasi tinggi. Berdasarkan pertimbangan luasnya jenis limbah dan batasan konsentrasi yang dapat diolah melalui teknologi *supercritical water oxidation* (SCWO), teknologi ini dirasa dapat menjadi solusi yang tepat. Namun untuk dapat diaplikasikan dalam skala industri, SCWO mempunyai kendala berupa korosi dan *plugging*. Karena itu melalui penelitian ini, akan dirancang suatu unit proses SCWO yang mampu meminimalisir permasalahan korosi dan *plugging*. Sementara, untuk kondisi operasi SCWO yang melibatkan temperatur dan tekanan sangat tinggi, akan dibuat sistem integrasi (baik panas maupun kerja) yang dapat membuat unit operasi ini menjadi lebih ekonomis.

1.3 Tujuan Penelitian

Untuk menjawab kebutuhan akan pengolahan limbah, sistem SCWO akan dikembangkan terutama untuk memenuhi aspek ekonomis. Oleh karena itu, dilakukan beberapa perbaikan pada unit proses, khususnya untuk mengatasi permasalahan korosi dan *plugging*. Dari latar belakang permasalahan ini, dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian tesis ini adalah sebagai berikut:

Merancang unit proses SCWO dengan menganalisa konfigurasi reaktor utama, perbaikan proses, pemilihan kondisi operasi, pemilihan material, perancangan sistem kontrol, dan integrasi energi yang dapat dilakukan agar aspek ekonomis dapat tercapai.

1.4 Kerangka Penelitian



Gambar 1.1 Kerangka penelitian

Secara garis besar dapat digambarkan bahwa kerangka penelitian tesis ini dapat dibagi menjadi 3 tahap, yaitu proposal tesis (termasuk di dalamnya sudah terdapat kajian literatur juga), kajian literatur, dan perancangan unit proses seperti dapat dilihat pada Gambar 1.1.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini mencakup kajian literatur yang akan memberikan penilaian teknik berupa perancangan unit proses SCWO, termasuk:

1. Pemilihan konfigurasi reaktor utama.
2. Perbaikan proses.
3. Pemilihan kondisi operasi (P, T, oksidan) dan material.
4. Pertimbangan keamanan dan perancangan sistem kontrol.
5. Penerapan integrasi sistem panas dan kerja pada unit operasi.