



TUGAS AKHIR - RE 141581

**REMEDIASI TANAH TERKONTAMINASI
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON
(PAH) DENGAN PENAMBAHAN SURFAKTAN
BIODEGRADABLE PADA METODE *CO-
COMPOSTING***

BANG PUTRA SINAGA
3311 100 073

DOSEN PEMBIMBING:
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum., M.App.Sc.

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - RE 141581

**REMEDICATION OF PAHs-CONTAMINATED SOIL
BY THE ADDITION BIODEGRADABLE
SURFACTANT THROUGH CO-COMPOSTING
METHOD**

**BANG PUTRA SINAGA
3311 100 073**

**SUPERVISOR:
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum., M.App.Sc.**

**DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

LEMBAR PENGESAHAN

REMEDIASI TANAH TERKONTAMINASI POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON (PAH) DENGAN PENAMBAHAN SURFAKTAN BIODEGRADABLE PADA METODE CO- COMPOSTING

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Bang Putra Sinaga
NRP. 3311 100 073

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc
NIP : 195307061984032004



REMEDIASI TANAH TERKONTAMINASI *POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON* (PAH) DENGAN PENAMBAHAN SURFAKTAN PADA METODE *CO-COMPOSTING*

Nama Mahasiswa : Bang Putra Sinaga
NRP : 3311 100 073
Jurusan : Teknik Lingkungan FTSP - ITS
Pembimbing : Prof. Dr. Yulinah T., M.App.Sc.

ABSTRAK

Tanah di sekitar area tambang batu bara kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan mengandung polutan *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAH) dengan konsentrasi tinggi. PAH merupakan jenis polutan organik karena sifatnya yang resisten di alam, bersifat karsinogenik, dan meningkatkan risiko mutasi gen. Tujuan penelitian ini yaitu (1) menentukan pengaruh variasi umur kompos terhadap degradasi PAH pada proses *co-composting*, (2) menentukan pengaruh penambahan surfaktan terhadap degradasi PAH pada proses *co-composting*, dan (3) menentukan efisiensi penyisihan PAH dengan metode *co-composting*.

Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium selama 60 hari pengamatan. Variasi yang dilakukan berupa penambahan surfaktan *biodegradable* (Tween 80) dengan konsentrasi 0, 2, dan 4 % b/b. Variasi lainnya adalah umur kompos yang ditambahkan, yaitu sampah segar, kompos setengah jadi, dan kompos jadi. Campuran bahan kompos dengan rasio tanah terkontaminasi dengan kompos adalah 50:50 % b/b.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kompos dan surfaktan mampu mendegradasi kadar PAH secara signifikan, kecuali pada reaktor dengan penambahan sampah segar dan kompos jadi. Reaktor dengan penambahan sampah setengah jadi mampu meningkatkan biodegradasi PAH sebesar 65,94% dibandingkan terhadap reaktor kontrol. Sementara reaktor dengan penambahan surfaktan 2% dan 4% secara berturut-turut mampu meningkatkan persentase biodegradasi sebesar 33,35% dan 54,62%.

Kata kunci : Bioremediasi, *co-composting*, kompos, PAH, surfaktan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

REMEDIATION OF PAHs-CONTAMINATED SOIL BY THE ADDITION OF BIODEGRADABLE SURFACTANT USING CO- COMPOSTING METHOD

Student Name : Bang Putra Sinaga
Student ID : 3311 100 073
Department : Environmental Engineering, FTSP-ITS
Supervisor : Prof. Dr. Yulinah T., M.App.Sc.

ABSTRACT

The soil around coal mining area in Tapin regency, South Kalimantan, contains high concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs). PAHs is a group of organic compounds, which is classified as recalcitrant with carcinogenic property. This compound can increase the risk of gene mutation. The aims of this study are (1) to determine the effect of surfactant on PAHs biodegradation through co-composting method, (2) to determine the effect of compost stability on PAHs biodegradation through co-composting method, and (3) to determine the removal efficiency of PAHs during the co-composting process.

This study was conducted for 60 days in laboratory scale. Two variables were used in this experiment, namely different concentrations of biodegradable surfactant (Tween 80) application and different ages of compost materials. Tween 80 was applied at 0, 2, and 4 % w/w concentrations. Fresh yard waste, half done, and mature compost materials were applied in different reactors. The raw materials for the bioremediation process were composed of PAHs-contaminated soil and compost material of 50:50 w/w ratio.

This study showed that the addition of compost and surfactant was able to decrease PAHs level significantly, except in reactors where yard waste and mature compost were used. Application of half done compost was able to increase PAHs removal up to 65.94% compared to that in the control reactor. The addition of Tween 80 of 2% and 4% concentrations were able to increase PAHs removal to 33.35% and 54.62% respectively.

Key words: Bioremediation, co-composting, compost, PAHs, surfactant.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur dipanjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa dimana atas limpahan rahmat dan berkat-Nya, laporan tugas akhir yang berjudul “Remediasi Tanah Terkontaminasi *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAH) dengan Penambahan Surfaktan pada Metode *Co-composting*” dapat diselesaikan. Dalam penyusunan laporan kemajuan ini, penyusun menyampaikan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc. sebagai dosen pembimbing dan dosen wali yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing dan mengarahkan dalam penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih untuk semua ilmu yang telah dibagikan selama penyusunan tugas akhir ini.
2. Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D., sebagai koordinator tugas akhir dan dosen penguji, terimakasih untuk semua informasi, arahan, kritikan dan saran yang membangun dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Welly Herumurti, S.T., M.Sc., sebagai dosen penguji Tugas Akhir.
4. Ir. Eddy S. Soedjono, Dipl.SE., MSc., Ph.D sebagai Kepala Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS.
5. Ayah dan Ibu yang selalu mendoakan dan memberi dukungan. Terimakasih untuk semua pengorbanan dan kasih sayang untuk mendukung anaknya untuk mengejar cita cita.
6. Abang, kakak, dan semua keluarga yang selalu mendukung, khususnya buat kak Julican dan Kak Marta yang baik hati mereview laporan tugas akhir ini dan memberi dukungan financial.
7. Pak Andy Mizwar dan Mbak Gina Lova Sari atas kerja sama dan dukungannya dalam satu tim penelitian. Terimakasih buat semua sharing ilmu dan pengalaman yang dibagikan, cerita susah dan senang yang telah dilalui bersama.

8. Teman-teman angkatan 2011 Teknik Lingkungan FTSP-ITS atas segala bantuan, dukungan, kritik, dan saran.

Penyusunan laporan tugas akhir ini telah diusahakan semaksimal mungkin, namun karena keterbatasan yang dihadapi menjadikan laporan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penyusun sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan penelitian selanjutnya.

Surabaya, Januari 2014

Penyusun

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Senyawa PAH.....	5
2.1.1 Karakteristik Senyawa PAH	5
2.1.2 Jenis Jenis Senyawa PAH	6
2.1.4 Potensi Pencemaran PAH di Tanah	7
2.1.5 Biodegradasi PAH.....	9
2.2 Pengolahan Tanah Terkontaminasi PAH	10
2.3 Bioremediasi Tanah Tercemar PAH.....	11
2.4 Teknologi Pengolahan <i>Co-composting</i>	12
2.5 Senyawa Surfaktan.....	16
2.5.1 Jenis Jenis Surfaktan	17
2.5.2 Mekanisme Kerja Surfaktan	18
2.5.3 Penambahan Surfaktan Dalam Metode <i>Co-composting</i>	19
2.6 Penelitian Terdahulu.....	20

BAB 3 METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Umum.....	21
3.2 Kerangka Penelitian.....	21
3.3 Tahapan Penelitian	23
3.3.1 Ide Penelitian.....	23
3.3.2 Rumusan Masalah	23
3.3.3 Studi Pustaka	24
3.3.4 Uji Pendahuluan	24
3.3.5 Persiapan Penelitian	24
3.3.6 Pelaksanaan Penelitian.....	26
3.3.7 Uji Parameter.....	29
3.3.8 Analisis Data dan Pembahasan	30
3.3.9 Kesimpulan dan Saran	31
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Karakteristik Bahan Baku	33
4.2 Kondisi Lingkungan Selama Proses <i>Co-composting</i> Tanah Terkontaminasi PAH Batu bara	35
4.2.1 Analisis Suhu.....	38
4.2.2 Analisis pH.....	43
4.2.3 Analisis Kadar Air	47
4.2.4 Rasio C/N	52
4.3 Biodegradasi PAH Selama Proses <i>Co-composting</i>	56
4.3.1 Konsentrasi PAH dalam Bahan Baku <i>Co-Composting</i>	56
4.3.1 Pengaruh Penambahan Variasi Umur Kompos Terhadap Degradasi PAH Pada Metode <i>Co-Composting</i>	64

4.3.2 Pengaruh Penambahan Surfaktan <i>Biodegradable</i> (Tween 80) Terhadap Degradasi PAH Pada Metode <i>Co-Composting</i>	69
BAB 5_KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS	85
LAMPIRAN B DATA HASIL ANALISIS.....	99
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN	103
LAMPIRAN D SPESIFIKASI TWEEN 80.....	111

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Alur degradasi senyawa PAHs oleh bakteri dan jamur.....	10
Gambar 3.1 Kerangka metode penelitian.....	22
Gambar 3.2 Desain Reaktor Penelitian.....	25
Gambar 3.3 Peta lokasi pengambilan sampel tanah terkontaminasi PAH batu bara	27
Gambar 4.1 Diagram reduksi volume masing masing reaktor	36
Gambar 4.2 Diagram reduksi massa masing masing reaktor	37
Gambar 4.3 Pola suhu reaktor T100%; TS2; TS4; dan Suhu ruang.....	41
Gambar 4.4 Pola suhu reaktor K0S0; K0S2; K0S4; dan Suhu Ruang	42
Gambar 4.5 Pola suhu reaktor K1/2S0; K1/2S2; K1/2S4; dan Suhu Ruang	42
Gambar 4.6 Pola suhu reaktor K1S0; K1S2; K1S4; dan Suhu Ruang	43
Gambar 4.7 Pola pH reaktor T100%; TS2; TS4; dan Suhu ruang.....	45
Gambar 4.8 Pola pH reaktor K0S0; K0S2; K0S4; dan Suhu Ruang	46
Gambar 4.9 Pola pH reaktor K1/2S0; K1/2S2; K1/2S4; dan Suhu Ruang	46
Gambar 4.10 Pola pH reaktor K1S0; K1S2; K1S4; dan Suhu Ruang	47
Gambar 4.11 Pola kadar air reaktor T100%; TS2; TS4; dan Suhu ruang	50
Gambar 4.12 Pola kadar air reaktor K0S0; K0S2; K0S4; dan Suhu Ruang.....	51
Gambar 4.13 Pola kadar air reaktor K1/2S0;	

	K1/2S2; K1/2S4; dan Suhu Ruang.....	51
Gambar 4.14	Pola kadar air reaktor K1S0; K1S2; K1S4; dan Suhu Ruang.....	51
Gambar 4.15	Perbandingan rasio C/N kompos awal dan akhir selama proses co-composting	53
Gambar 4.16	Konsentrasi PAH awal (H-0) masing masing reaktor	57
Gambar 4.17	Konsentrasi PAH akhir (H-60) masing masing reaktor	60
Gambar 4.18	Konsentrasi PAH awal dan akhir masing masing reaktor	57
Gambar 4.19	Tingkat reduksi PAH hari ke-60.....	65
Gambar 4.20	Pertumbuhan jamur pada bahan kompos	67
Gambar 4.21	Tingkat reduksi PAH pada masing masing reaktor	69
Gambar 4.22	Tingkat reduksi PAH pada masing masing reaktor	70
Gambar 4.23	Mekanisme peningkatan bioavailabilitas PAH dengan penambahan surfaktan.....	71
Gambar 4.24	Grafik pembentukan misel.....	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Daftar prioritas senyawa PAH.....	6
Tabel 2.2 Kondisi Optimum Proses Komposting.....	13
Tabel 2.3 Spesifikasi Kualitas Kompos	16
Tabel 3.1 Perlakuan pada Reaktor penelitian	28
Tabel 3.2 Metode Analisis Parameter	29
Tabel 4.1 Karakteristik awal bahan kompos.....	33
Tabel 4.2 Rasio C/N bahan baku campuran kompos	52
Tabel 4.3 Rasio C/N masing masing kompos	55
Tabel 4.4 Konsentrasi PAHs dalam masing masing reaktor (H-0).....	58
Tabel 4.5 Konsentrasi PAHs dalam masing masing reaktor (H-60).....	61
Tabel 4.6 Persentase reduksi masing masing reaktor	63

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Batu bara merupakan salah satu sumber energi penting di dunia dengan angka pertumbuhan eksplorasi dan konsumsinya lebih cepat dari minyak, gas, nuklir, dan sumber energi pengganti lainnya. Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki kandungan mineral batu bara yang cukup besar. Jumlah sumber daya batu bara Indonesia tahun 2005 berdasarkan perhitungan Pusat Sumber Daya Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral adalah sebesar 61,36 miliar ton. Sedangkan produksi batu bara nasional di tahun 2013 mencapai 421 juta ton dengan lokasi penambangan batu bara yang tersebar di Kalimantan, Sumatera, dan Sulawesi (ESDM, 2013). Seperti halnya aktivitas penambangan lain di Indonesia, penambangan batu bara telah menimbulkan kerusakan lingkungan berupa pencemaran air, polusi udara, kerusakan hutan, erosi, akumulasi polutan di sedimen, dan kontaminasi tanah (Raden *et al.*, 2010).

Potensi pencemaran lingkungan yang ditimbulkan dari proses eksplorasi dan produksi batu bara salah satunya adalah pencemaran tanah yang terkontaminasi oleh senyawa *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAH). PAH adalah senyawa organik yang tersebar luas di alam, yang mengandung dua atau lebih rantai benzena (Munawir, 2007), dan memiliki berat molekul relatif tinggi, serta bersifat hidropobik dengan kecenderungan berikatan dengan senyawa organik padat sehingga sulit untuk diuraikan. Karena sifatnya yang resisten di alam, senyawa PAH merupakan senyawa bersifat toksik terhadap lingkungan (Ahmad, 2012). Ahrens & Morrisey (2005), Pies *et al* (2007), dan Wang *et al* (2010), mengemukakan bahwa potensi pencemaran PAH batu bara terutama disebabkan aktivitas industri pengolahan batu bara (Arbabi *et al.*, 2010), aktivitas penambangan terbuka, pengolahan, pembuangan limbah, dan penimbunan, serta kegiatan bongkar muat di pelabuhan dan kecelakaan dalam kegiatan pengangkutan. Penelitian terdahulu (Mizwar & Trihadingrum, 2014) mengemukakan bahwa konsentrasi PAH di sekitar area tambang batu bara (*stockpile*, *hauling road*, dan

pelabuhan khusus batu bara) di Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan masing-masing 11,79; 32,33; dan 55,30 (mg/kg). Bahkan Achten & Hofmann (2009), mengemukakan bahwa konsentrasi PAH dapat mencapai ratusan bahkan dapat mencapai ribuan milligram per-kilogram batu bara. Tingginya konsentrasi PAH dalam batu bara dipengaruhi oleh jenis zat organik, suhu, dan tekanan dalam proses pembentukan batu bara. Senyawa PAH dikenal sebagai polutan berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan.

Hasil penelitian menunjukkan tentang bahaya senyawa PAH memiliki sifat karsinogenik dan meningkatkan risiko mutasi gen dalam tubuh manusia. PAH dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui kontak dengan kulit, terhirup atau melalui saluran pencernaan. Tingginya potensi bahaya yang ditimbulkan oleh senyawa PAH memaksa Uni Eropa dan US-EPA memiliki regulasi tentang ambang batas maksimum senyawa PAH di lingkungan, khususnya di dalam tanah. Uni Eropa menetapkan nilai baku mutu lingkungan untuk konsentrasi PAH dalam tanah pertanian 5 mg/kg dan 100 mg/kg untuk tanah sebagai fasilitas umum. Sedangkan US-EPA menetapkan nilai ambang batas lebih ketat, yakni 1 mg/kg untuk semua jenis peruntukan tanah. Sehingga untuk mengurangi risiko bahaya senyawa PAH dalam tanah perlu dilakukan pengolahan terhadap tanah yang terkontaminasi oleh senyawa PAH.

Pengolahan tanah terkontaminasi oleh senyawa PAH masih jarang dilakukan khususnya dalam kasus penambangan batu bara. Salah satu pengolahan tanah terkontaminasi yang potensial untuk diaplikasikan adalah remediasi tanah karena efektif dan murah. Degradasi senyawa PAH dalam tanah memanfaatkan peranan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga sebagai pengurai dalam bioremediasi (Antizar *et al.*, 2004). Dalam penelitian ini akan dilakukan penambahan sampah organik sebagai co-substrat dalam metode *co-composting*. Dalam penelitiannya, Zhang (2011), mengemukakan bahwa persentase degradasi senyawa PAH oleh mikroorganisme meningkat hingga kisaran 67% dengan adanya pencampuran sampah organik dengan tanah terkontaminasi dalam proses *co-composting*. Selain itu, untuk meningkatkan laju degradasi PAH akan

dilakukan penambahan surfaktan *biodegradable* (Tween 80) sebagai *emulsifier*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas dapat dirumuskan masalah yang mendasari penelitian ini:

1. Bagaimana efisiensi degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dengan metode *co-composting* ?
2. Bagaimana pengaruh variasi umur kompos dalam penguraian PAH dalam tanah terkontaminasi dibandingkan dengan kontrol ?
3. Bagaimana pengaruh penambahan surfaktan dalam proses degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dibandingkan dengan kontrol ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menentukan efisiensi degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dengan metode *co-composting*.
2. Membandingkan pengaruh variasi umur kompos dalam penguraian PAH dalam tanah terkontaminasi dibandingkan dengan kontrol.
3. Menentukan pengaruh penambahan surfaktan dalam proses degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dibandingkan dengan kontrol.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mendapatkan suatu alternatif teknologi pengolahan tanah terkontaminasi senyawa PAH yang efektif.
2. Memberikan informasi ilmiah tentang efektivitas degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dengan metode *co-composting*.
3. Memberikan informasi dan rekomendasi terhadap pemerintah dan industri batu bara dalam pengolahan tanah terkontaminasi senyawa PAH untuk mengurangi

risiko bahaya terhadap kesehatan manusia ataupun lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang Lingkup yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Sampel tanah terkontaminasi PAH yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari area pelabuhan khusus batu bara pada salah satu fasilitas pengangkutan batu bara di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan.
2. Jenis PAH yang dianalisis dalam penelitian ini terbatas pada 16 jenis polutan PAH prioritas US-EPA.
3. Proses pengolahan tanah terkontaminasi yang digunakan adalah metode *co-composting* dengan pencampuran tanah terkontaminasi dengan bahan baku kompos sebagai co-substrat.
4. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dan dilaksanakan di Workshop Penelitian, Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Senyawa PAH

2.1.1 Karakteristik Senyawa PAH

Senyawa PAH adalah senyawa organik yang tersebar luas di alam, yang mengandung dua atau lebih rantai benzena (Munawir, 2007), memiliki berat molekul relatif tinggi, dan bersifat hidropobik dengan kecenderungan berikatan dengan senyawa organik padat lainnya sehingga sulit untuk diuraikan. Kebanyakan senyawanya sedikit terlarut dalam air dan sedikit *volatile* (Sarhini, 2012). Senyawa PAH ditemukan sebagai senyawa aromatik polisiklis teralkilasi atau produk metabolitnya di lingkungan (Barlianti, 2009). PAH merupakan senyawa bersifat toksik terhadap lingkungan (Ahmad, 2012), karsinogenik, dan/atau mutagenik. Hal ini didasarkan sifatnya yang hidrofobik dan tidak memiliki gugus metil atau gugus reaktif lainnya untuk dapat diubah menjadi senyawa yang lebih polar. Akibatnya senyawa PAH sangat sulit diekskresi dari dalam tubuh dan biasanya terakumulasi pada jaringan hati, ginjal maupun adiposa atau lemak tubuh. Dalam penelitiannya (McKinney, 2006), mengemukakan bahwa paparan PAH dalam tubuh manusia akan masuk ke sistem limpa, sirkulasi darah, dan dipecah (metabolisme) di dalam liver dan ginjal. Struktur molekul yang menyerupai basa nukleat menyebabkan mudahnya PAH tersisipkan pada untaian DNA dan mengganggu fungsi DNA tersebut (Sarhini, 2012). Uji laboratorium menunjukkan bahwa katak yang terpapar PAH akan menetas lebih lama dan mengalami gangguan perkembangan, bahkan pada konsentrasi maksimum katak mati setelah enam hari terpapar (Bryer, 2006). Senyawa PAH terdapat di alam secara alami (pirogenik) atau hasil sisa kegiatan manusia (antropogenik) (US-EPA. 2008), yang terbentuk melalui dekomposisi termal senyawa organik yang mengandung karbon dan hidrogen (Barlianti, 2009).

Secara alami PAH mengalami transformasi dengan proses biotik dan abiotik seperti penguapan, adsorpsi, fotolisis, oksidasi kimiawi, dan degradasi biologis (Lors *et al.*, 2012). Bamforth & Singleton (2005) dan Cerniglia (1992), mengemukakan bahwa

PAH merupakan senyawa dengan kelarutan yang rendah dalam air dan resisten di alam. Resistensi PAH di alam dipengaruhi berbagai faktor utama seperti, struktur kimia PAH, konsentrasi polutan, dispersi PAH, dan bioavailabilitas kontaminan (Mizwar & Trihadiningrum, 2014). Secara umum, semakin tinggi berat molekul PAH, maka sifat PAH tersebut semakin hidrofobik, toksik, dan resisten PAH di lingkungan.

2.1.2 Jenis Jenis Senyawa PAH

Keberadaan senyawa PAH di alam sangat beragam, dengan lebih dari seratus jenis susunan struktur yang berbeda. Namun US-EPA pada tahun 2012 mendefinisikan senyawa PAH adalah jenis senyawa yang diketahui bersifat toksik terhadap manusia dan lingkungan. US-EPA telah membuat daftar prioritas 16 senyawa PAH yang harus diperhatikan karena bersifat toksik, karsinogenik dan/atau mutagenik (Haritash & Kaushik, 2009) seperti dalam Tabel 2.1 (Richardson, 1996).

Tabel 2.1 Daftar prioritas senyawa PAH (P₁₆)

No	Senyawa PAH	Formula	Berat Molekul
1	Naphtalene	C ₁₀ H ₈	128,16
2	Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	152,20
3	Acenaphthene	C ₁₀ H ₁₀	154,21
4	Fluprene	C ₁₄ H ₁₀	166,22
5	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	178,22
6	Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	178,22
7	Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	202,22
8	Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	228,29
9	Benzo(a)anthtacene	C ₁₈ H ₁₂	228,29
10	Chrysene	C ₁₈ H ₁₂	228,29
11	Benzo(b)fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252,32
12	Benzo(k)fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252,32
13	Benzo(a)pyrene	C ₂₀ H ₁₂	252,32
14	Dibenzo(a,h)anthracene	C ₂₂ H ₁₄	278,36
15	Benzo(g,h,i)perylene	C ₂₂ H ₁₂	276,34
16	Indenol(1,2,3-cd)pyrene	C ₂₂ H ₁₂	276,34

2.1.3 Sumber Pencemaran PAH

Pada dasarnya sumber pencemaran PAH dapat dibagi menjadi 2 kategori, yaitu :

- Sumber tetap, misalnya industri, pembangkit listrik dan panas, insenerasi sampah, pembakaran terbuka, penambangan terbuka, asap kebakaran hutan, aspal petroleum, beberapa pelarut komersial, dll.
- Sumber bergerak, misalnya kendaraan bermotor, transportasi pengangkutan minyak, batu bara, dll.

Selain itu PAH juga berasal dari sumber alami seperti kebakaran hutan dan lahan, rembesan minyak, letusan gunung berapi serta eksudat dari pohon (Gan *et al.*, 2009; Haritash & Kaushik, 2009). Karena sifatnya yang hidropobik, PAH lebih mudah bercampur dengan minyak daripada tanah sehingga PAH di lingkungan biasanya ditemukan di subtansi berminyak, endapan (sedimen), dan terakumulasi di tanah (Sarbini, 2012).

Salah satu sumber kontaminasi PAH terbesar di tanah adalah dari aktivitas penambangan batu bara, pengolahan batu bara, pembuangan limbah penambangan batu bara, penimbunan batu bara di *stockpile* serta tumpahan selama bongkar-muat batu bara di pelabuhan dan kecelakaan transportasi pengangkutan batu bara (Mizwar & Trihadiningrum, 2014).

PAH lebih banyak terkumpul pada partikel padatan, sedimen, dan dalam tanah. PAH cenderung terakumulasi dalam jaringan lemak yang tidak banyak mengandung air. Melalui aliran air hujan dan sungai, PAH dapat sampai ke laut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Ahmad (2012), mengemukakan bahwa kandungan PAH di Teluk Jakarta Bagian Barat berkisar 201,57-474,68 ppb dengan total PAH 1404,68 ppb, di Bagian Tengah 104,61-337,07 ppb dengan total 825,63 ppb, dan di Bagian Timur 112,91-370,79 ppb dengan total 806,73 ppb. Sumber PAH dalam air laut dan sedimen ini berasal dari berbagai sumber yakni pembakaran bahan organik, pembakaran minyak bumi, dan tumpahan minyak (Ahmad, 2012).

2.1.4 Potensi Pencemaran PAH di Tanah

Pencemaran tanah adalah keadaan dimana bahan kimia alami dan/atau buatan manusia masuk dan mengubah tatanan

tanah alami (Halifah, 2012). Berdasarkan PP No. 150 tahun 2000, disebutkan bahwa kerusakan tanah untuk produksi biomassa adalah berubahnya sifat dasar tanah yang melampaui kriteria baku kerusakan tanah. Pencemaran tanah ini biasanya terjadi karena adanya kebocoran limbah cair atau bahan kimia industri, penggunaan pestisida, masuknya air pencemar ke dalam lapisan sub-permukaan, kecelakaan kendaraan pengangkut minyak, air limbah dari penimbunan sampah, dan penambangan terbuka (Halifah, 2012). Pencemaran tanah oleh PAH merupakan masalah penting yang belum dapat diselesaikan hingga saat ini. Permasalahan tersebut muncul karena tingginya aktivitas penambangan batu bara di Indonesia, khususnya wilayah Kalimantan dan Sumatera (Mukaromah, 2012).

Pencemaran tanah oleh PAH dihasilkan dari proses penambangan, pengolahan, pengangkutan, dan pembuangan limbah batu bara. Menurut Dyke *et al.* (2003); Ferdanes *et al.* (2002); Beck *et al.* (1996); dan Antizar *et al.* (2004) mengemukakan bahwa keberadaan PAH di dalam tanah berasal dari aktivitas alami (pirogenik) seperti kebakaran hutan dan letusan gunung berapi ataupun dari hasil kegiatan manusia (antropogenik) berupa pembakaran tidak sempurna, kecelakaan transportasi, insenerasi sampah, penimbunan, dan pembuangan limbah minyak dan batu bara. Pencemaran ini dapat menyebabkan kerusakan tanah dan pencemaran lingkungan sehingga menimbulkan efek yang tidak diinginkan. Sifat fisik dan kimia tanah yang tercemar akan mengalami perubahan dengan adanya pencemaran tanah tersebut. Penurunan aktivitas dan populasi organisme yang hidup dalam tanah akibat pencemaran telah mempengaruhi kesuburan tanah secara langsung atau tidak langsung. Deteksi PAH di tanah biasanya dilakukan dengan menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectroscopy*), atau kromatografi cair dengan sinar tampak (ultraviolet) atau metode spektroskopik floresens serta metode cepat dengan PAH indikator. Umumnya dilakukan analisis dengan ekstraksi dan purifikasi untuk mengetahui kandungan PAH pada sampel uji (Sarhini, 2012).

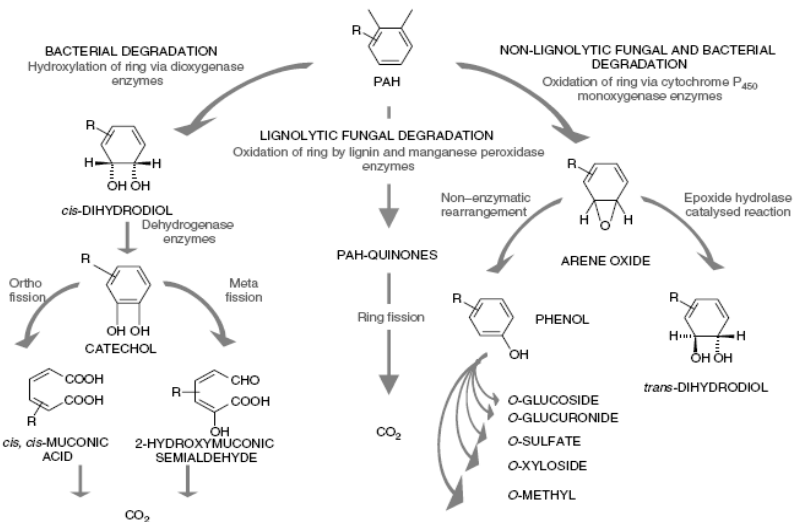
2.1.5 Biodegradasi PAH

Biodegradasi merupakan proses alami oleh mikroorganisme yang menggunakan hidrokarbon sebagai sumber makanan dan menghasilkan karbondioksida, air, biomassa, dan senyawa oksidasi lain dari hasil metabolismenya. Proses biodegradasi merupakan salah satu oksidasi dasar, dimana enzim bakteri mengkatalisis perempatan oksigen dalam hidrokarbon, sehingga molekul dapat digunakan dalam metabolisme seluler. Beberapa molekul didegradasi secara sempurna menjadi CO₂ dan H₂O, sedangkan yang lain diubah dan digabungkan menjadi biomassa. Keberhasilan proses biodegradasi banyak ditentukan oleh aktivitas enzim. Untuk itu perlu dicari mikroorganisme yang berpotensi menghasilkan enzim pendegradasi hidrokarbon (PAH), kemudian aktivitasnya dioptimalkan dengan pengaturan kondisi dan penambahan suplemen yang sesuai (Sarbini, 2012). Proses biodegradasi PAH oleh mikroorganisme melibatkan enzim dioxygenase dan dihydrogenase dalam pemutusan rantai oksigen dan hidrogen. Selain itu, bioemulsifier yang dihasilkan oleh mikroorganisme juga berperan dalam meningkatkan kelarutan dari senyawa PAH dalam medium sehingga memudahkannya untuk diuraikan. Menurut Cerniglia (1992), Kanaly & Harayama (2000) dan Mizwar & Trihadiningrum (2014) mengemukakan alur degradasi PAH oleh mikroorganisme khususnya bakteri dan jamur. Bakteri akan mengoksidasi PAH melalui pemecahan cincin dan asimilasi karbon, sedangkan proses detoksifikasi PAH dimulai dengan hidroksilasi filamen oleh jamur.

Dalam hal ini perlu diperhatikan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja mikroorganisme seperti kandungan air, pH, suhu, nutrisi yang tersedia, penambahan surfaktan, dan atau tidak adanya material toksik. Bamforth & Singleton (2005) mengemukakan bahwa bakteri mesofilik (pertumbuhan optimum pada suhu 20°C- 40°C) memiliki efisiensi degradasi lebih tinggi dibandingkan bakteri yang hidup pada suhu lebih dingin (psikrofilik) atau lebih panas (termofilik).

Jenis polutan organik yang dapat dibiodegradasi adalah BTEX, minyak bumi, polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), PCB, senyawa nitroaromatik, phenol berklor, senyawa alifatik terklorinasi, dan metal. Limbah batu bara yang mengandung

PAH, didegradasi oleh mikroba menjadi senyawa sederhana. Namun demikian, selalu terdapat senyawa-senyawa yang tidak dapat dibiodegradasi oleh mikroba. Sekumpulan mikroba tertentu akan mendegradasi komponen hidrokarbon secara berurutan dan berantai. Populasi yang hidup dan berkembang sesuai dengan keberadaan substrat yang tersedia. Pada Gambar 2.1 dijelaskan alur degradasi senyawa PAH oleh bakteri dan jamur.



Gambar 2.1 Alur degradasi senyawa PAH oleh bakteri dan jamur (Bamforth & Singleton, 2005)

2.2 Pengolahan Tanah Terkontaminasi PAH

Tingginya potensi bahaya yang ditimbulkan oleh senyawa PAH memaksa Uni Eropa dan US-EPA memiliki regulasi tentang ambang batas maksimum senyawa PAH di lingkungan, khususnya didalam tanah. Uni Eropa secara umum, menetapkan nilai baku mutu lingkungan untuk konsentrasi PAH dalam tanah pertanian 5 mg/kg dan 100 mg/kg untuk tanah sebagai fasilitas umum. Beberapa negara Eropa seperti Inggris menetapkan ambang batas konsentrasi PAH ditanah sebesar 500 mg/kg untuk taman rekreasi dan 10.000 mg/kg untuk lahan dengan pelapis keras (semen/aspal) (Antizar-Ladislao, 2004). Negara Belanda

yang mengadopsi peraturan tersebut menetapkan nilai ambang batas konsentrasi lebih rendah yaitu 40 mg/kg (Wilson & Jones, 1992). Sedangkan US-EPA menetapkan nilai ambang batas lebih ketat, yakni 1 mg/kg untuk semua jenis peruntukan tanah. Tingginya konsentrasi PAH dalam tanah memerlukan teknologi pengolahan yang tepat.

Menurut Kasmidjo (1990), suatu negara maju yang telah memiliki standar kualitas lingkungan khususnya tanah, pemulihan tanah yang terkontaminasi dilakukan dengan 3 cara yaitu

- Penyimpanan tanah terkontaminasi dengan cara digali dan dibawa ke gudang penyimpanan untuk selanjutnya disimpan sementara sampai ditemukan teknik pengolahan yang tepat.
- Teknik *ex-situ* merupakan pemisahan bahan pencemaran dari tanah atau menguraikan energi panas untuk menguapkan kontaminan dari tanah.
- Teknik *in-situ* pengolahan tanah terkontaminasi di tempat secara biologis atau kimia.

Menurut Agamuthu (2013), perbedaan teknik *ex-situ* dan *in-situ* adalah tingkat kejenuhan tanah dan aerasi pada area pengolahan. Teknik *in-situ* didefinisikan sebagai pengolahan tanah terkontaminasi dengan dan air tanah yang mengalami pengadukan sedangkan teknik *ex-situ* merupakan pengolahan tanah yang telah diisolasi dan diangkat lalu ditambahkan air untuk pengkondisian. Hal ini tentu sangat berpengaruh terhadap biostimulan remediasi, dimana kemampuan degradasi mikroorganisme terhadap senyawa organik dan organik dapat ditingkatkan.

2.3 Bioremediasi Tanah Tercemar PAH

Remediasi adalah proses yang bertujuan untuk menghilangkan, merusak, atau mengubah bentuk dari zat pencemar (kontaminan) sehingga tidak berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Agamuthu, 2013). Untuk melakukan pengolahan terhadap tanah terkontaminasi dapat dilakukan melalui proses fisik-kimia ataupun biologis. Remediasi ada tiga bentuk, yaitu remediasi fisik (isolasi dan pewadahan ke suatu tempat cemar), remediasi kimia (solidifikasi dan ekstraksi kimia), dan remediasi biologi (*biofilter*, *bioventing*, dll) (Pulungan,

2013). Teknik remediasi yang paling umum dikenal dengan istilah bioremediasi.

Bioremediasi (remediasi secara biologi) itu sendiri adalah proses pembersihan pencemar tanah dengan menggunakan bantuan mikroorganisme (jamur dan bakteri) (Pulungan, 2013). Bioremediasi merupakan pengolahan tanah terkontaminasi yang ramah lingkungan dengan harga yang relatif terjangkau dalam aplikasinya, meskipun prosesnya lebih lambat dari teknologi pengolahan lainnya (Llado, 2012). Namun pada aplikasinya, teknik bioremediasi sangat dipengaruhi oleh faktor biotik dan abiotik lingkungan (Mizwar & Trihadiningrum, 2014) diantaranya; suhu, pH, jenis tanah, aerasi, nutrisi, ke dalaman, difusi, adaptasi mikroba, paparan bahan kimia sebelumnya, ketersediaan air, toksisitas sedimen, sifat fisiko-kimia PAH, konsentrasi PAH, faktor musim (Mizwar & Trihadiningrum, 2014), bioavailabilitas zat pencemar, tingkat kemampuan degradasi, dan mikroorganisme (Llado *et al.*, 2012). Dalam konteks ini salah satu teknologi bioremediasi yang paling sering digunakan adalah proses *co-composting*.

2.4 Teknologi Pengolahan *Co-composting*

Komposting adalah proses dekomposisi yang dilakukan oleh mikroorganisme terhadap buangan organik yang bersifat *biodegradable*. Sejak 15 tahun terakhir, komposting telah banyak dikembangkan sebagai teknologi pengolahan untuk remediasi dan reklamasi lahan tercemar (Scheibli, 2002). Komposting telah banyak dipakai dalam remediasi tanah tercemar zat organik, tidak terbatas untuk limbah dari minyak dan non minyak, dan pestisida organik.

Co-composting sebagai pengomposan biasa, adalah penambahan bahan kimia untuk meningkatkan laju reaksi dan komposisi kompos. *Co-composting* juga dapat diartikan sebagai penggunaan jenis limbah lain bersamaan dengan limbah yang biasanya digunakan pada proses pengomposan untuk meningkatkan proses sekaligus mengurangi pembuangan limbah lain (Hapsari, 2014). Dengan adanya penambahan bahan kimia ataupun limbah lain pada proses komposting, diharapkan akan meningkatkan laju degradasi polutan pada tanah terkontaminasi. Berdasarkan penelitian Scheibli (2002) dan Bamforth & Singleton

(2005), serat kayu dan jerami merupakan media komposting yang layak untuk digunakan karena ketersediaan karbon dalam serat yang cukup dan kaya akan zat lignin.

Sedangkan Atagana (2012), mengemukakan bahwa penambahan kotoran hewan sebagai biostimulan dalam proses *co-composting* sangat efektif khususnya dalam pendegradasian senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi. Dalam penelitiannya, Schiebli (2002), menyebutkan ada beberapa hal mendasar yang perlu diperhatikan untuk proses remediasi biologis termasuk *co-composting* yaitu; kualitas mikrobiologi, jenis karbon yang terkandung dalam limbah, kandungan mikro dan makro nutrien, aerasi yang cukup, tingkat kelembapan dan *trace element*. Faktor yang mempengaruhi proses pengomposan dibagi menjadi dua kelompok, berdasarkan formula campuran kompos dan proses pengolahannya. Formula campuran kompos antara lain rasio C/N, pH, ukuran partikel, dan kelembapan. Sedangkan di dalam proses pengolahannya yaitu, konsentrasi oksigen, suhu, dan kandungan air (Bernal *et al.*, 2009). Tabel 2.2 menunjukkan kondisi optimum proses komposting.

Tabel 2.2 Kondisi Optimum Proses Komposting

Parameter	Nilai
*C/N – rasio bahan	15-30 : 1
C/P – rasio bahan	75-150 : 1
Bentuk/ ukuran materi	3,3 – 7,6 cm untuk proses biasa sederhana
Kadar air	50-60%
Aerasi	0,6 - 1,8 m ³ udara/hari/kg bahan selalu proses termofilik, sedang untuk proses selanjutnya makin berkurang
Temperatur maksimum	55°C

Sumber: *Antizar Ladislao (2004) & Suriawiria (2002)

Menurut Suriawiria (2002), banyak faktor yang mempengaruhi proses pembuatan kompos, baik biotik maupun abiotik. Faktor –faktor tersebut antara lain:

- Pemisahan bahan
Bahan-bahan yang sekiranya lambat atau sukar untuk didegradasi/diurai, harus dipisahkan, baik yang berbentuk

logam, batu, maupun plastik. Bahkan, bahan-bahan tertentu yang bersifat toksik serta dapat menghambat pertumbuhan mikroba, harus benar-benar dibebaskan dari dalam timbunan bahan, misalnya residu pestisida.

➤ Ukuran Materi

Semakin kecil dan homogen bentuk bahan, semakin cepat dan baik pula proses pengomposan. Karena dengan bentuk bahan yang lebih kecil dan homogen, lebih luas permukaan bahan yang dapat dijadikan substrat bagi aktivitas mikroba. Selain itu, bentuk bahan berpengaruh pula terhadap kelancaran difusi oksigen yang diperlukan serta pengeluaran CO₂ yang dihasilkan. Untuk hasil yang maksimal pada proses pengomposan, maka ukuran partikel material organik yang akan diolah harus berkisar 25-75 mm.

➤ Nutrien (Rasio C/N)

Nilai rasio C/N bahan organik merupakan faktor yang penting dalam proses komposting untuk mengevaluasi kematangan kompos (Aboulwafe *et al.*, 2008). Hal tersebut disebabkan karena karbon (C) merupakan sumber energi bagi mikroorganisme, sedangkan nitrogen (N) digunakan untuk membangun sel tubuh (reproduksi sel) mikroorganisme (Permatasari, 2013). Untuk aktivitas mikroba di dalam tumpukan sampah memerlukan sumber nutrien karbon, misalnya antara 20% - 40% yang digunakan, akan diasimilasikan menjadi komponen sel dan CO₂. Jika dibandingkan sumber karbon dengan sumber nitrogen yang terdapat di dalamnya (rasio C/N) ideal untuk proses komposting adalah 15-30, dimana rasio kompos jadi adalah berkisar 10-20 (SNI 19-7030-2004).

➤ Kadar air

Kadar air sangat berpengaruh terhadap kelangsungan hidup mikroorganisme. Kadar air tergantung kepada bentuk dan jenis bahan, misalnya, kadar air optimum di dalam pengomposan bernilai antara 50% – 60%, terutama selama proses fase pertama. Kadang-kadang dalam keadaan tertentu, kadar air bahan bisa bernilai sampai 85%, misalnya pada jerami. Kadar air <40% akan menyebabkan proses dekomposisi bahan organik

melambat dan akan berhenti jika kadar air <30% (Kardin, 2011).

Menurut Kardin (2011), ada tiga metode komposting yang umum dilakukan, yaitu:

- *Wind Row System*
Wind Row System merupakan metode pembuatan kompos paling sederhana dan paling murah. Bahan baku kompos ditumpuk memanjang dengan ketinggian 0,6-1 meter dan lebar 2-5 meter serta panjangnya 40-50 meter. Metode ini memanfaatkan sirkulasi udara secara alami sehingga sangat dipengaruhi dimensi tumpukan bahan baku kompos, kelembapan, dan ruang pori. Kelemahan dari metode ini adalah memerlukan areal lahan yang cukup luas.
- *Aerated Static Pile System*
Secara prinsip proses komposting dengan metode *Aerated Static Pile System* hampir sama dengan *Wind Row System*. Namun pada metode ini, sirkulasi udara dimasukkan melalui pipa berlubang dengan bantuan diffuser. Proses komposting dikontrol dengan pengaliran oksigen dimana jika temperatur tinggi maka aliran oksigen dihentikan dan sebaliknya. Pada metode ini juga, selama proses komposting tidak ada pengadukan dilakukan sehingga bahan baku kompos harus dibuat homogen sejak awal.
- *In Vessel System*
In Vessel System mempergunakan kontainer, silo atau parit memanjang sebagai tempat bahan baku kompos. Metode ini biasanya dilakukan untuk mengurangi pengaruh bau yang tidak sedap yang dikeluarkan selama proses komposting. Metode ini juga mempergunakan pengaturan udara sama seperti sistem *Aerated Static Pile*.

Setelah proses komposting dilakukan, berikut merupakan spesifikasi kompos jadi seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi Kualitas Kompos

Parameter	satuan	Standar
Kadar air	%	±50
Temperatur		suhu air tanah
Warna		kehitaman
Ukuran partikel	Mm	0,55 - 25
pH		6,80 - 7,49
C/N Rasio		10 -20
Bahan Organik	%	27- 58

Sumber: SNI: 19-7030-2004

2.5 Senyawa Surfaktan

Senyawa aktif permukaan atau surfaktan adalah suatu senyawa yang telah diketahui dapat menjadi penstabil emulsi. Surfaktan memiliki dua gugus molekul yang berbeda kepolarannya. Satu jenis hidrofilik (suka air) sedangkan gugus yang lainnya hidropobik (tidak suka air). Surfaktan merupakan suatu molekul yang memiliki gugus hidrofilik dan gugus lipofilik sekaligus sehingga dapat menyatukan campuran yang terdiri dari air dan minyak. Aktivitas surfaktan diperoleh karena sifat ganda dari molekulnya. Molekul surfaktan memiliki bagian polar yang suka akan air (hidrofilik) dan bagian non polar yang suka akan minyak/lemak (lipofilik). Bagian polar molekul surfaktan dapat bermuatan positif, negatif, atau netral. Sifat rangkap ini yang menyebabkan surfaktan dapat diadsorpsi pada antar muka udara-air, minyak-air, dan zat padat-air, membentuk lapisan tunggal dimana gugus hidrofilik berada pada fase air dan rantai hidrokarbon ke udara, dalam kontak dengan zat padat ataupun terendam dalam fase minyak. Umumnya bagian non polar (lipofilik) adalah merupakan rantai alkil yang panjang, sementara bagian yang polar (hidrofilik) mengandung gugus hidroksil (Jatmika, 1998).

Surfaktan pada umumnya disintesis dari turunan minyak bumi, seperti linier alkilbensen sulfonat, alkil sulfonat, alkil etoksilat, dan alkil etoksilat sulfat (Herawan, 1998). Penggunaan surfaktan sangat bervariasi, seperti bahan deterjen, kosmetik, farmasi,

makanan, tekstil, industri plastik, dll. Beberapa produk pangan seperti margarin dan es krim menggunakan surfaktan sebagai salah satu bahannya. Penggunaan surfaktan terbagi atas tiga golongan, yaitu sebagai bahan pembasah (*wetting agent*), bahan pengemulsi (*emulsifying agent*), dan bahan pelarut (*solubilizing agent*). Penggunaan surfaktan ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan emulsi dengan cara menurunkan tegangan permukaan, antara fase minyak dan fase air.

2.5.1 Jenis Jenis Surfaktan

Klasifikasi surfaktan berdasarkan muatannya dibagi menjadi empat golongan yaitu:

1. Surfaktan anionik yaitu surfaktan yang bagian alkilnya terikat pada suatu anion. Contohnya adalah garam alkana sulfonat, garam olefin sulfonat, garam sulfonat asam lemak rantai panjang.
2. Surfaktan kationik yaitu surfaktan yang bagian alkilnya terikat pada suatu kation. Contohnya garam alkil trimetil ammonium, garam dialkil-dimethyl ammonium, dan garam alkil dimethyl benzil ammonium.
3. Surfaktan nonionik yaitu surfaktan yang bagian alkilnya tidak bermuatan. Contohnya ester gliserin asam lemak, ester sorbitan asam lemak, ester sukrosa asam lemak, polietilena alkil amina, glukamina, alkil poliglukosida, mono alkanol amina, dialkanol amina, dan alkil amina oksida.
4. Surfaktan amfoter yaitu surfaktan yang bagian alkilnya mempunyai muatan positif dan negatif. Contohnya surfaktan yang mengandung asam amino, betain, fosfobetain.

Ditinjau dari produksinya, surfaktan dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu surfaktan sintesis (kimia) dan biosurfaktan. Surfaktan sintesis biasanya digunakan dalam industri perminyakan, makanan, dan industri farmasi (Singh, 2006). Sedangkan dari segi materi penyusun, surfaktan dibedakan menjadi surfaktan *biodegradable* dan surfaktan *nonbiodegradable*. Perbedaan dari kedua jenis surfaktan ini adalah jenis materi penyusunnya, yang menyebabkan beda laju degradasi atau terurai di alam. Perbedaan laju pengurai antara

surfaktan *biodegradable* dan *nonbiodegradable* juga mempengaruhi laju degradasi dari PAH di tanah (Chi, 2010). Senyawa surfaktan yang terbuat dari alkylbenzene sulfonat (ABS) relatif sukar didegradasi sehingga tergolong sebagai surfaktan *nonbiodegradable* (contoh TX-100). Contoh senyawa surfaktan *biodegradable* adalah Tween 80 (Polysorbate 80). Bautista *et al.* (2009) mengidentifikasi pengaruh penambahan surfaktan Triton-X, Tergitol NP-10, dan Tween 80 terhadap bakteri *Enterobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, dan *Stenotrophomonas sp.* dalam mendegradasi PAH. Hasilnya menunjukkan bahwa Tween 80 memberikan efek racun terhadap pertumbuhan bakteri di awal (<24 jam) dan menunjukkan biodegradasi yang baik selanjutnya, sedangkan Triton-X dan Tergitol NP-10 memberikan efek racun yang lebih kuat dan tidak ditemukan peningkatan biodegradasi terhadap PAH. Menurut Yao *et al.* (2013), untuk mengurangi efek racun Tween 80 terhadap bakteri (*Alicyclobacillus sp.*), adalah dengan mencampurnya dengan sampah latex.

2.5.2 Mekanisme Kerja Surfaktan

Fungsi surfaktan adalah untuk meningkatkan daya pembasahan air sehingga senyawa hidropobik atau berlemak dapat dibasahi, mengendorkan tegangan permukaan, dan mensuspensikan zat yang telah terlepas. Surfaktan yang biasa digunakan dalam deterjen adalah linear alkilbenzene sulfonat, etoksisulfat, alkil sulfat, etoksilat, senyawa amonium kuarterner, imidazolin, dan betain. Linear alkilbenzene sulfonat, etoksisulfat, alkil sulfat bila dilarutkan dalam air akan berubah menjadi partikel bermuatan negatif, memiliki daya bersih yang sangat baik, dan biasanya berbusa banyak (biasanya digunakan untuk pencuci kain dan pencuci piring).

Penambahan surfaktan dalam larutan akan menyebabkan turunnya tegangan permukaan larutan. Setelah mencapai konsentrasi tertentu, tegangan permukaan akan konstan walaupun konsentrasi surfaktan ditingkatkan. Bila surfaktan ditambahkan melebihi konsentrasi ini, maka surfaktan mengagregasi membentuk misel. Konsentrasi terbentuknya misel ini disebut *Critical Micelle Concentration (CMC)*. Tegangan permukaan akan menurun hingga CMC tercapai. Setelah CMC tercapai, tegangan permukaan akan konstan yang menunjukkan

bahwa antar muka menjadi jenuh dan terbentuk misel yang berada dalam keseimbangan dinamis dengan monomernya (Genaro, 1990). Dalam penelitiannya, Hu *et al.* (2014), mengemukakan bahwa kelarutan senyawa hidropobik (PAH) akan berbanding lurus dengan konsentrasi surfaktan dalam kondisi telah mencapai CMC. Sehingga pembentukan misel merupakan kunci dari degradasi PAH.

Menurut Nurdianto (2008), cara kerja dari surfaktan sangatlah unik karena bagian yang hidrofilik akan masuk ke dalam larutan yang polar dan bagian yang hidropobik akan masuk ke dalam bagian yang non polar sehingga surfaktan dapat menggabungkan (walaupun sebenarnya tidak bergabung) kedua senyawa yang seharusnya tidak dapat bergabung tersebut. Namun kinerja surfaktan tergantung pada komposisi dari surfaktan tersebut. Jika bagian hidrofilik lebih dominan daripada hidrofobik maka surfaktan akan larut dalam air, sedangkan jika surfaktan lebih banyak bagian hidrofobiknya maka akan larut dalam lemak dan keduanya tidak dapat berfungsi sebagai surfaktan. Bagian lipofilik molekul surfaktan adalah bagian nonpolar, biasanya terdiri dari senyawa hidrokarbon aromatik atau kombinasinya, baik jenuh maupun tidak jenuh. Bagian hidrofilik merupakan bagian polar dari molekul, seperti gugusan sulfonat, karboksilat, ammonium kuartener, hidroksil, amina bebas, eter, ester, amida. Biasanya, perbandingan bagian hidrofilik dan lipofilik dapat diberi angka yang disebut kesetimbangan hidrofilik dan lipofilik yang disingkat KHL, dari surfaktan.

2.5.3 Penambahan Surfaktan Dalam Metode *Co-composting*

Senyawa surfaktan kimia dan biosurfaktan merupakan senyawa amfifilik yang dapat menurunkan tekanan permukaan, meningkatkan kelarutan, dan mobilitas dari senyawa hidropobik (*insoluble organic compounds*) (Prince, 1997; Rosenberg & Ron, 2002; Muligan, 2005; Singh, 2006). Bioavailabilitas dan kecepatan biodegradasi dari polutan hidropobik juga dipengaruhi oleh penambahan surfaktan. Namun, penambahan surfaktan dalam aplikasi bioremediasi juga terkadang sebagai penghambat dalam pertumbuhan dan kecepatan degradasi dari mikroorganisme. Kemampuan surfaktan sebagai stimulan atau

penghambat dalam bioremediasi dipengaruhi oleh karakteristik dari surfaktan, jenis polutan, dan jenis mikroorganisme (Banat *et al.*, 2000; Van Hamme *et al.*, 2003; Singh, 2006). Di alam, biosurfaktan memainkan peran fisiologis dalam meningkatkan bioavailabilitas dari molekul hidrofobik (Kearns & Losick, 2003). Surfaktan juga dilibatkan dalam proses pembentukan biofilm. Surfaktan akan bereaksi dengan protein mikroorganisme dan dimanipulasi untuk mengubah pembentukan enzim dengan cara merombak aktivitas enzim, stabilitas, dan/atau *specificity* (Kamiya *et al.*, 2000). Surfaktan kimia juga dapat memberikan efek yang sama dengan biosurfaktan dan telah banyak dipelajari, sebagai contoh, sebagai anti mikroorganisme dan meningkatkan degradasi dari kontaminan kimiawi (Singh, 2006). Adanya korelasi positif antara laju degradasi dan daya serap polutan mengindikasikan bahwa surfaktan berperan dalam meningkatkan bioavailabilitas dari polutan yang terakumulasi. Surfaktan *biodegradable* (Tween 80) mempengaruhi daya serap pyrene (PAH) dalam sel bakteri dan mampu meningkatkan laju degradasinya (Zhang *et al.*, 2012).

2.6 Penelitian Terdahulu

Antizar-Ladislao (2005), melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh suhu dan variasi campuran tanah dengan sampah organik dalam degradasi PAH. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa degradasi PAH tertinggi (efisiensi 75,2%) dicapai dengan suhu 38°C dan menggunakan variasi campuran tanah: sampah organik = 0,8: 1 (kg).

Dalam penelitiannya, Chi (2010), mengemukakan bahwa penambahan surfaktan *biodegradable* (1-2 % Tween 80 atau TX-100) dapat meningkatkan kelarutan PAH hingga 30 kali lebih besar.

Gonzales *et al.* (2011), mengemukakan bahwa tingkat pertumbuhan bakteri dan degradasi PAH sangat rendah dengan penambahan surfaktan *nonbiodegradable* (Tergitol NP-10) sedangkan penambahan surfaktan *biodegradable* (Tween 80) mampu mereduksi kadar toksisitas PAH hingga 70%.

Sayara *et al.* (2010), mengemukakan bahwa kompos jadi (kompos stabil) dapat meningkatkan degradasi PAH oleh mikroorganisme melalui desorpsi PAH oleh zat humus kompos.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Umum

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental skala laboratorium. Eksperimen dilaksanakan di Workshop Penelitian, Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS. Penelitian ini dilakukan selama 60 hari pengamatan dengan pengulangan dua kali.

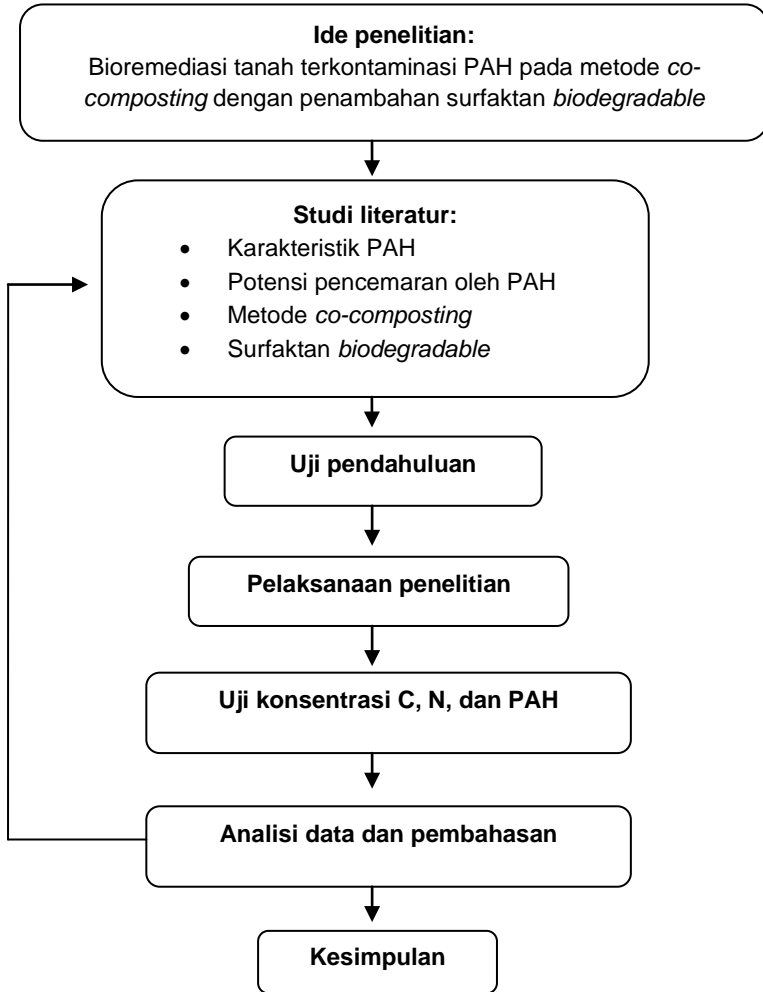
3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran umum mengenai tahapan pelaksanaan penelitian yang diperlukan sehingga penelitian dapat dilakukan dengan terarah untuk mencapai hasil yang diharapkan.

Tujuan dibuat kerangka berpikir ini adalah:

1. Sebagai gambaran dasar mengenai tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis sehingga pelaksanaan penelitian dan penulisan laporan penelitian ter-arah.
2. Memberikan informasi terkait dengan pelaksanaan penelitian untuk memudahkan pelaksanaan penelitian dan pencapaian tujuan penelitian.
3. Mengantisipasi terjadinya kesalahan yang mungkin terjadi sebagai penghambat dalam melaksanakan penelitian.

Kerangka penelitian dalam penelitian ini akan dijelaskan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Kerangka metode penelitian

3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini melalui beberapa tahapan pelaksanaan. Tahapan penelitian meliputi ide penelitian, merumuskan masalah, studi pustaka, penentuan variabel dan parameter penelitian, uji pendahuluan, analisis data, pembahasan, dan penarikan kesimpulan. Dengan adanya tahapan penelitian secara sistematis akan membantu pelaksanaan penelitian sesuai dengan prosedur sehingga mampu menjawab tujuan dan sasaran penelitian.

3.3.1 Ide Penelitian

Konsentrasi PAH sangat tinggi di area pelabuhan khusus batu bara pada salah satu fasilitas pengangkutan batu bara di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan. PAH merupakan senyawa organik kompleks yang bersifat toksik terhadap lingkungan, karsinogenik, dan mutagenik. Karena tingginya potensi risiko yang ditimbulkan oleh PAH terhadap kesehatan manusia dan pencemaran lingkungan, maka diperlukan pengolahan tanah terkontaminasi PAH yang efektif, mudah diaplikasikan, dan murah.

Pengolahan tanah terkontaminasi dengan metode bioremediasi masih jarang diteliti, khususnya metode *co-composting*. *Co-composting* merupakan penambahan dua bahan kompos sehingga dapat meningkatkan laju degradasi polutan dalam tanah. Penambahan surfaktan sebagai *emulsifier* dan sampah organik sebagai substrat utama diharapkan dapat meningkatkan persentase degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi.

3.3.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah merupakan permasalahan yang akan terjawab dari hasil penelitian ini. Rumusan masalah dari penelitian ini diantaranya : bagaimana pengaruh penambahan surfaktan dalam proses degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dengan metode *co-composting*, bagaimana pengaruh variasi umur kompos sebagai substrat utama dalam penguraian PAH dalam tanah terkontaminasi, dan bagaimana

efisiensi degradasi senyawa PAH dalam tanah terkontaminasi dengan metode *co-composting*.

3.3.3 Studi Pustaka

Studi pustaka digunakan untuk mengumpulkan informasi yang mendukung dan memperkuat hasil analisis penelitian. Adapun sumber yang dijadikan sumber referensi dalam penyusunan tinjauan pustaka ini adalah *textbook*, artikel, jurnal penelitian, dan sebagainya.

3.3.4 Uji Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk mendapatkan data yang diperlukan sebelum melaksanakan penelitian. Penelitian pendahuluan ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik awal tanah terkontaminasi PAH batu bara dan bahan kompos yang digunakan. Parameter yang diuji meliputi konsentrasi PAH, pH, suhu, kadar air, C-organik, dan N-organik. Pertama-tama sampel bahan kompos diambil dengan metode komposit. Metode komposit merupakan pengambilan sampel dari dua reaktor yang mengalami perlakuan sama dan dicampur hingga menjadi satu sampel yang baru. Metode komposit ini dilakukan untuk mendapatkan sampel yang representatif dan mengantisipasi *sampling error*. Selanjutnya dilakukan uji laboratorium untuk mengetahui kadar parameter yang diukur. Uji kadar PAH dilakukan di laboratorium Oseanografi LIPI Jakarta, sedangkan uji C-organik dan N-organik dilakukan di laboratorium Pengelolaan Lahan UPN Surabaya. Kadar air diukur dengan menggunakan alat Aquaterr T-350 serta pH dan suhu masing-masing menggunakan alat soil tester T-350 dan Aquaterr T-350. Hasil dari penelitian pendahuluan ini akan dijadikan sebagai acuan dasar parameter bahan kompos penelitian.

3.3.5 Persiapan Penelitian

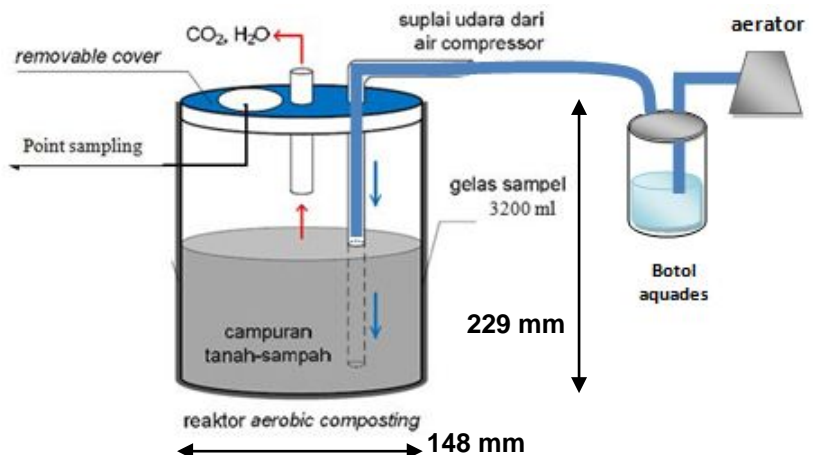
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Kaca berdimensi 148 x 229 mm dengan volum 3,2 L sebagai reaktor penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3.2.
2. Botol kaca dengan volume 100 ml sebagai tempat aquades

3. Selang, untuk mengalirkan udara dari aerator. *Aluminium foil*, untuk melapisi bagian tutup dari reactor dan selang aerator.
4. Timbangan, untuk menimbang tanah dan sampah organik.
5. Pipet ukur, untuk mengukur volume surfaktan.
6. Mesin pencacah, untuk mencacah sampah organik.
7. Ayakan/saringan 10 mesh, untuk menyaring tanah dan sampah organik agar didapatkan ukuran partikel ≤ 2 mm.
8. Soil tester T-350, untuk mengukur suhu dan pH bahan kompos selama proses *co-composting*.
9. Aerator, untuk aerasi pada reaktor.
10. Aquaterr T-350, untuk mengukur kadar air pada bahan kompos.

Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:

1. Tanah terkontaminasi PAH batu bara dari area pelabuhan khusus batu bara pada salah satu fasilitas pengangkutan batu bara di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan.
2. Kompos dengan variasi umur (sampah segar, sampah setengah jadi, dan kompos jadi).
3. Aquadest, untuk kontrol kelembaban di dalam reaktor.
4. Surfaktan *Biodegradable* (Tween 80).



Gambar 3.2 Desain Reaktor Penelitian

3.3.6 Pelaksanaan Penelitian

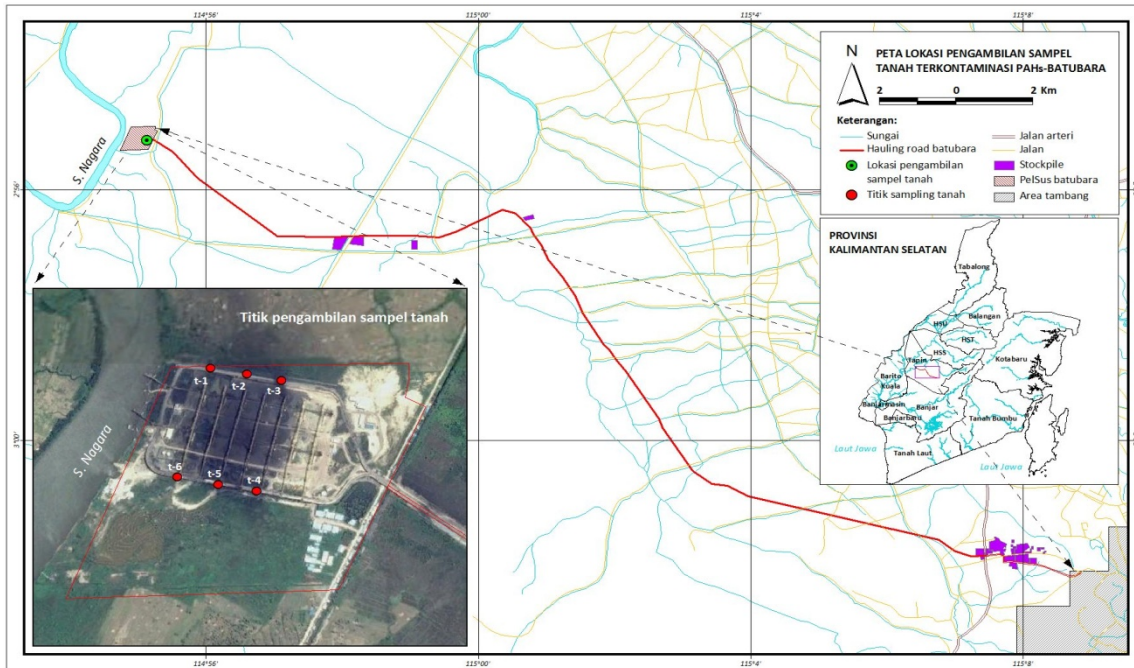
➤ Persiapan Sampel Tanah

Pengambilan sampel tanah terkontaminasi PAH dilakukan di area pelabuhan khusus batu bara pada salah satu fasilitas pengangkutan batu bara di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan. Peta lokasi pengambilan sampel tanah seperti pada Gambar 3.3. Sampel yang diambil adalah tanah permukaan dari ke dalaman 5-20 cm secara *purposive sampling*. Pengambilan sampel tanah dilakukan menggunakan bor tanah manual. Pewadahan sampel tanah tidak boleh menggunakan bahan plastik. Hal ini disebabkan kemungkinan terjadinya reaksi antara pthalate esters dengan hidrokarbon lain dari plastik (US-EPA, 2007). Sampel tanah kemudian dicampur dan diaduk hingga homogeny. Sampel tanah tersebut kemudian diayak untuk mendapatkan ukuran partikel ≤ 2 mm dan memisahkan zat pengotor seperti batu, kerikil, dan sampah.

➤ Pengambilan dan Preparasi Kompos Sebagai Campuran Tanah

Kompos yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Rumah Kompos Kebun Bibit Surabaya, dengan bahan baku sampah daun dan ranting. Kompos yang ditambahkan terdiri dari tiga variasi umur kompos, yaitu sampah segar, kompos setengah jadi, dan kompos jadi. Sampah segar adalah sampah daun dan ranting yang baru masuk ke rumah kompos dan dicacah dengan mesin pencacah hingga ukuran partikelnya homogen. Kompos setengah jadi adalah kompos yang berusia 14 hari pengomposan dengan ciri fisik lembab, suhu tinggi (35° - 50° C), warna kehitaman, ukuran partikel sedang, dan bau menyengat. Sedangkan kompos jadi adalah kompos yang telah stabil dengan usia ≥ 25 hari dengan ciri fisik: warna kehitaman, tidak berbau, dan ukuran partikel halus.

Semua jenis sampah organik ini di cacah menggunakan mesin pencacah dan diayak menggunakan ayakan/saringan 10 mesh agar mendapatkan ukuran partikel ≤ 2 mm (Zhang *et al.*, 2011). Kemudian diaduk hingga homogen agar didapatkan komposisi sampah organik yang sama.



Gambar 3.3 Peta lokasi pengambilan sampel tanah terkontaminasi PAH batu bara

➤ **Prosedur Penelitian**

Penelitian ini menggunakan 9 variasi ditambah dengan 3 kontrol seperti pada Tabel 3.1. Penelitian ini menggunakan pengulangan sebanyak dua kali, sehingga jumlah total reaktor adalah 24 buah. Berikut merupakan variasi penelitian yang akan dilakukan:

Tabel 3.1 Perlakuan Pada Reaktor Penelitian

Reaktor	Komposisi Tanah	Penambahan Surfaktan (%)	Jumlah Reaktor
	Terkontaminasi dan Sampah Organik (%)		
T100%	100 : 0	0	2
TS2	100 : 0	2	2
TS4	100 : 0	4	2
K0S0	50 : 50	0	2
K0S2	50 : 50	2	2
K0S4	50 : 50	4	2
K1/2S0	50 : 50	0	2
K1/2S2	50 : 50	2	2
K1/2S4	50 : 50	4	2
K1S0	50 : 50	0	2
K1S2	50 : 50	2	2
K1S4	50 : 50	4	2
Total Reaktor			24

Penelitian ini diawali dengan menyiapkan sampel tanah, kompos yang telah diayak, dan surfaktan. Kadar air tanah dan kompos dikondisikan sebesar 50% dengan cara penambahan aquades. Selanjutnya tanah ditimbang seberat 0,5 kg, dan ditambahkan surfaktan *biodegradable* (Tween 80) dengan variasi penambahan 0%, 2%, dan 4 % kemudian diaduk hingga merata. Variasi konsentrasi penambahan surfaktan mengacu pada Chi (2010) yang mengemukakan bahwa kondisi optimum

penambahan surfaktan sebesar 2 % (w/w). Setelah itu, ditambahkan kompos seberat 0,5 dengan variasi sampah segar, kompos setengah jadi, dan kompos jadi dan dicampur hingga homogen. Penentuan variasi umur kompos mengacu pada Sayara *et al.* (2010) yang mengemukakan bahwa umur kompos mempengaruhi laju degradasi PAH pada metode *co-composting*.

Campuran tersebut dimasukkan ke dalam masing-masing reaktor yang telah disiapkan. Kemudian dilakukan pengkondisian reaktor secara aerobik dengan pemasangan selang aerator dalam reaktor. Reaktor akan disuplai udara sebesar 25 L/jam/kg. Nilai ini mengacu pada kisaran suplai udara pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang *et al.* (2011) yaitu sebesar 3 - 25 L/jam/kg. Setiap hari dilakukan pengukuran suhu reaktor sedangkan pengukuran pH dan kadar air setiap 5 hari sekali. Pada akhir penelitian yaitu hari ke-60 dilakukan pengambilan sampel untuk analisis kadar PAH, bahan C-organik, dan N-organik kompos.

3.3.7 Uji Parameter

Uji parameter hasil penelitian dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI Jakarta dan Laboratorium Pengelolaan Lahan UPN Surabaya. Sampel uji kompos diambil setelah dilakukan pengadukan rata dan dilakukan dengan metode komposit. Untuk uji parameter kadar PAH, N-organik, dan C-organik dalam kompos dilakukan pada awal dan akhir penelitian yaitu hari ke-0 dan ke-60.

Pengukuran kadar air, pH, dan suhu juga dilakukan untuk mengetahui kondisi selama proses *co-composting*. Metode analisis yang digunakan pada setiap parameter dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Metode Analisis Parameter

Parameter	Waktu Sampling	Metode Analisis	Sumber
PAH	Awal dan akhir penelitian	<i>Gas Chromatography Mass Spectrometric (GC-MS)</i>	Grasshoff <i>et al.</i> , 1983 dan MacLeod <i>et al.</i> , 1993
N-organik	Awal dan akhir penelitian	Kjeldahl	APHA AWWA, 1998
C-organik	Awal dan akhir	Gravimetri	Horwitz (Ed.),

Parameter	Waktu Sampling	Metode Analisis	Sumber
Kadar air	penelitian		2008
pH	Setiap 5 hari	Aquaterr T-350 pH meter	- APHA AWWA, 1998
Suhu	Setiap hari	Termometer	APHA AWWA, 1998

3.3.8 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis dilakukan untuk menentukan efisiensi degradasi senyawa PAH dan untuk menentukan pengaruh umur kompos sebagai substrat utama dalam metode *co-composting* serta menentukan pengaruh penambahan surfaktan *biodegradable* terhadap laju degradasi PAH.

Analisis data dilakukan dengan uji statistik.

1. Uji Korelasi Signifikansi

Uji Korelasi Signifikansi untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel bebas (penambahan surfaktan dan variasi umur kompos) terhadap variabel terikat (tingkat degradasi PAH).

Korelasi Pearson

Bertujuan untuk mengetahui hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat.

Rumus Korelasi Pearson:

$$r = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}}$$

dengan ;

- r = koefisien korelasi variabel x dengan variabel y
- XY = jumlah hasil perkalian antara variabel x dengan variabel y
- X = jumlah nilai setiap variabel
- Y = jumlah nilai konstan
- N = jumlah subjek penelitian.

✚ Uji Signifikan

Signifikansi/probabilitas (α) memberikan gambaran seberapa besar pengaruh penambahan kompos dan surfaktan terhadap efisiensi degradasi PAH dengan metode *co-composting*.

Untuk pengujian angka signifikansi digunakan kriteria sebagai berikut:

- Jika angka signifikansi $<0,05$, maka pengaruh kedua variabel bebas terhadap variabel terikat signifikan.
- Jika angka signifikansi $>0,05$, maka pengaruh kedua variabel bebas terhadap variabel terikat tidak signifikan.

$$t = r \sqrt{\frac{n - 2}{1 - r^2}}$$

dengan;

n = jumlah sampel

r = nilai korelasi

Hipotesis yang diuji adalah :

H₀ = koefisien korelasi adalah sama dengan nol,

H_a = koefisien korelasi tidak sama dengan nol, signifikan.

Semua hasil dari penelitian dan analisis dibahas secara detail sehingga tujuan penelitian tercapai.

3.3.9 Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisis dan pembahasan terhadap data yang telah dikumpulkan, selanjutnya adalah menarik kesimpulan dan saran penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan merupakan fakta pengujian yang didapatkan dari hasil analisis dan pembahasan, serta menjawab tujuan awal penelitian. Sedangkan saran adalah ulasan yang ditujukan untuk perbaikan bagi penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Bahan Baku

Bahan baku campuran kompos terdiri dari tanah terkontaminasi senyawa PAH yang diambil dari area pelabuhan khusus batu bara pada salah satu fasilitas pengangkutan batu bara di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan. Sampel tanah pada area tersebut merupakan tanah dengan konsentrasi PAH tertinggi sesuai dengan penelitian terdahulu (Mizwar & Trihadiningrum, 2014). Sedangkan kompos diambil dari rumah kompos Kebun Bibit, Surabaya.

Penelitian ini dilaksanakan dalam skala laboratorium dengan pengulangan dua kali menggunakan reaktor kaca. Masing-masing reaktor diisi bahan kompos seberat 1 kg dengan komposisi tanah terkontaminasi : kompos adalah 0,5:0,5 (kg). Sebelum dilakukan pencampuran masing-masing bahan kompos, dilakukan pengondisian bahan kompos. Pengondisian bahan kompos meliputi penambahan aquades untuk meningkatkan kadar air bahan kompos hingga $\geq 50\%$. Sebaliknya, penjemuran dilakukan untuk mengurangi kadar air dalam bahan kompos. Setelah kadar air dalam masing-masing bahan kompos dikondisikan, bahan campuran kompos selanjutnya diaduk hingga merata dan dimasukkan ke dalam reaktor. Selanjutnya, dilakukan pengukuran suhu dan pH awal serta pengambilan sampel untuk analisis rasio C/N dan konsentrasi PAH. Karakteristik awal bahan kompos meliputi suhu, pH, kadar air, rasio C/N, dan konsentrasi PAH dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik awal bahan kompos

Kode Reaktor	Suhu	Kadar air	pH
T100%	32	50	7
TS2	32	50	7
TS4	31,5	50	7
KOSO	33,5	55	5,5
KOS2	34	55	5

Kode Reaktor	Suhu	Kadar air	pH
KOS4	35	60	5
K1/2SO	33	60	6,5
K1/2S2	34	60	6
K1/2S4	33	60	6,5
K1SO	33,5	60	7
K1S2	34	55	7
K1S4	33	55	6,5

Menurut Suriawiria (2002), faktor faktor yang mempengaruhi pengomposan meliputi pemisahan bahan kompos, ukuran materi, kadar air, pH, suhu, aerasi, dan ketersediaan nutrien (rasio C/N). Dalam penelitian ini, pengomposan diusahakan sedemikian rupa hingga tercapai kondisi pengomposan yang ideal. Bahan baku campuran kompos telah dipisahkan dengan bahan bahan pengotor seperti batu, kerikil, sampah anorganik, dan bahan pengotor lainnya. Hal ini dilakukan untuk memisahkan bahan bahan *nonbiodegradable* dalam bahan baku kompos yang dapat menghambat proses pengomposan. Khusus bahan baku kompos yang diambil dari Rumah Kompos Kebun Bibit banyak mengandung material yang sulit didegradasi seperti potongan plastik kecil, kain, dan karet. Sedangkan ukuran materi bahan baku campuran kompos didapat dengan cara pencacahan dan pengayakan.

Pada Tabel 4.1 diketahui karakteristik bahan baku campuran kompos sebelum dilakukan proses *co-composting*. Pengukuran suhu dan pH menggunakan alat Soil tester T-350, sedangkan kadar air diukur dengan alat Aquaterr T-350. Masing-masing pengambilan sampel dilakukan setelah pencampuran bahan kompos dan dimasukkan ke dalam reaktor. Khusus untuk analisis rasio C/N dilakukan pengambilan sampel 50 g. Sedangkan untuk analisis konsentrasi PAH diambil sampel 75 g dan masing-masing diawetkan didalam *freezer* pada suhu $\leq 10^{\circ}\text{C}$ sebelum dilakukan analisis. Hal ini dilakukan agar tidak ada aktivitas metabolisme mikroorganisme di dalam sampel sehingga tidak mengubah komposisi kandungan senyawa kimianya.

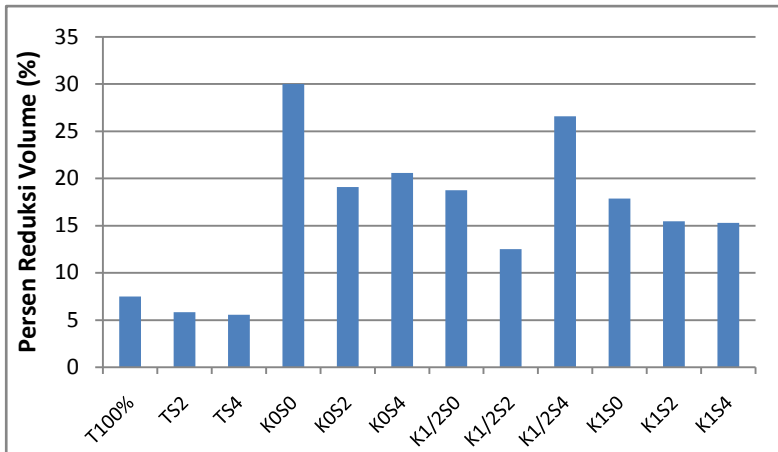
Selanjutnya dilakukan proses running (*co-composting*) selama 60 hari dalam kondisi aerobik dan dilakukan pengamatan setiap hari terhadap masing-masing reaktor.

4.2 Kondisi Lingkungan Selama Proses *Co-composting* Tanah Terkontaminasi PAH Batu bara

Selama proses *co-composting* berlangsung, dilakukan pengamatan sekaligus analisis terhadap parameter tertentu yang mempengaruhi jalannya *proses co-composting*. Parameter tersebut diantaranya suhu, pH, kadar air, dan rasio C/N. Selain itu, pengamatan secara fisik juga dilakukan selama proses *co-composting* berlangsung untuk mengetahui kondisi fisik bahan kompos.

Pada awal pengamatan (H-0) kondisi fisik bahan kompos dengan bahan baku tanah terkontaminasi dan sampah segar cenderung kasar dan volumenya lebih besar dibandingkan dengan reaktor dengan bahan kompos tanah terkontaminasi dan kompos setengah jadi (K1/2S) atau kompos jadi (K1S). Namun, sebaliknya reaktor K1/2S dan K1S memiliki warna lebih hitam menyerupai tanah. Pada pengamatan hari ke-3, dinding masing-masing reaktor mengembun sebagai dampak dari naiknya suhu dan tingginya penguapan dalam reaktor. Selain itu, pada reaktor K1/2S dan K1S mulai ditumbuhi mikroorganisme jamur berwarna putih. Jamur tersebut tumbuh dibagian permukaan bahan kompos.

Pada hari ke-9, pertumbuhan jamur mulai merata dibagian permukaan bahan kompos dan volume reaktor mulai menyusut. Reduksi volume masing-masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.1. Cara mengukur reduksi volume dengan membandingkan volume akhir dengan volume awal. Volume reaktor didapat dengan menghitung tinggi bahan kompos dan mengalikannya dengan luas permukaan reaktor. Tinggi bahan kompos dapat diketahui dari penggaris yang ditempel pada dinding luar reaktor. Namun pengukuran ini kurang valid karena adanya faktor pengadukan sehingga volume bahan kompos kurang stabil. Reduksi volume dihitung setelah hari ke-60.

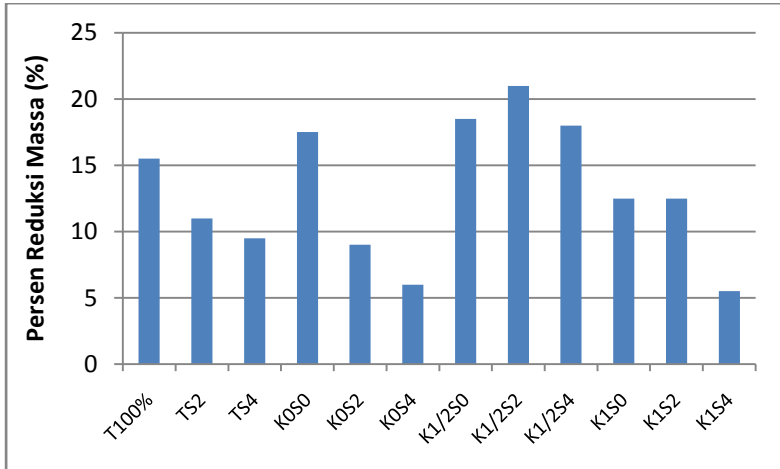


Gambar 4.1 Diagram reduksi volume masing-masing reaktor

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa reaktor dengan bahan kompos 100% tanah cenderung tetap volumenya (persen reduksi $\leq 10\%$). Sedangkan persen reduksi volume terbesar yaitu pada reaktor K0S0 dan K1/2S4 dan reduksi volume terkecil pada reaktor TS4. Masing-masing reduksi volume reaktor K0S0, K1/2S4 dan TS4 adalah 30%; 26,5%; dan 5,5%. Rata-rata reduksi volume bahan kompos dengan campuran sampah segar sangat tinggi, hal ini didasarkan materi sampah segar (mentah) yang kemudian berubah menjadi kompos jadi. Pada umumnya, reduksi volume bahan mentah menjadi kompos jadi berkisar 20-40 (%). Reduksi volume bahan kompos selama proses *co-composting* disebabkan oleh perubahan ukuran materi bahan kompos. Adanya aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan bahan kompos selama proses *co-composting* membantu dalam mereduksi volume bahan kompos. Selain itu reduksi volume bahan kompos juga dipengaruhi adanya pengambilan sampel selama proses *co-composting*.

Selain adanya reduksi volume terhadap bahan kompos, juga reduksi massa bahan kompos. Bahan kompos awal dan akhir ditimbang untuk mengetahui jumlah massa yang hilang

selama proses *co-composting* berlangsung. Persen reduksi massa masing-masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Diagram reduksi massa masing-masing reaktor

Pada Gambar 4.2 dapat diketahui persen reduksi massa masing-masing reaktor. Rata-rata reaktor kehilangan massa >10% dari massa awal kecuali pada reaktor TS4; K0S0; K0S4 dan K1S4. Kehilangan massa terbesar pada reaktor k1/2S2 yang mencapai 21% massa awal. Sebaliknya kehilangan massa paling kecil yaitu pada reaktor K1S4 (5,5%). Kehilangan massa bahan kompos selama proses *co-composting* disebabkan oleh aktivitas penguraian bahan kompos oleh mikroorganisme. Hasil metabolisme mikroorganisme selama proses *co-composting* telah mengubah materi kompos menjadi gas H₂O, CO₂, dan gas lainnya. Menurut Stentiford in Bertoldi *et al.* (1996), perpindahan massa terbesar selama proses komposting berlangsung adalah uap air yang berkaitan erat dengan pelepasan energi. Selain itu, suhu tinggi pada proses komposting (70°C) akan membantu menguapkan senyawa volatil dalam bahan kompos.

Selanjutnya pengamatan hari ke 20 terhadap bahan kompos menunjukkan bahwa tekstur bahan kompos khususnya reaktor K0S0; K0S2 dan K0S4 sangat halus dan lembut,

sedangkan reaktor lainnya, tekstur dan warna tidak terlalu berubah. Kondisi tekstur bahan kompos merupakan gambaran jalannya proses *co-composting*. Kondisi tekstur yang halus dan lembut mengindikasikan kompos telah matang. Setelah sejumlah besar karbon dalam kompos telah dimanfaatkan oleh mikroorganisme dan temperatur mulai turun, dalam bahan kompos mulai ditemui banyak serangga serangga kecil seperti tungau, kutu, cacing, dan jasad renik lainnya. Cacing dan kutu dalam kompos akan bertugas dalam mencampurkan substansi organik yang telah dicerna kembali oleh jamur dengan sejumlah tanah lempung (*clay*) dan kalsium yang terkandung di dalamnya menjadikan kompos sudah siap dijadikan sebagai pupuk.

Dalam penelitian ini, untuk mendukung kondisi aerobik dalam reaktor maka udara disuplai dari aerator. Menurut Tchobanoglous *et al.* (1993), perhitungan terhadap kebutuhan udara dilakukan berdasarkan komposisi kimia bahan baku. Namun, sesuai penelitian terdahulu oleh Zhang *et al.* (2011) mengungkapkan bahwa suplai udara optimum pada proses *co-composting* berkisar antara 3-25 L/jam/kg. Berdasarkan hal tersebut, maka suplai udara yang diinjeksikan ke dalam masing-masing reaktor sebesar 1,5 L/menit. Jika dikonversi maka besar suplai udara yang diinjeksi sama dengan 9 L/jam/kg.

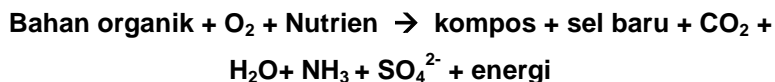
4.2.1 Analisis Suhu

Pengukuran suhu dilakukan setiap hari sekitar pukul 11.00-14.00 WIB. Pengukuran pada siang hari ditujukan agar suhu dalam reaktor stabil tidak terpengaruh oleh suhu ambien pada pagi atau malam hari yang relatif lebih dingin. Sebagai kontrol dalam pengukuran ini, suhu ruangan tempat reaktor juga diukur sehingga dapat diketahui pengaruh suhu ruang terhadap suhu reaktor. Hasil pengukuran suhu reaktor dan suhu ruangan selama 60 hari pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.3 hingga Gambar 4.6.

Pengamatan suhu dilakukan karena suhu merupakan salah satu indikator yang menandakan perubahan aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik termasuk PAH. Suhu tumpukan juga menunjukkan tingkat keseimbangan antara jumlah panas (kalor) yang dihasilkan oleh jasad renik dan pengudaraan (aerasi) selama proses komposting (Mirwan, 2012).

Selama proses *co-composting* berlangsung, fluktuasi suhu yang terjadi tidak terlalu signifikan. Suhu reaktor selama 60 hari pengamatan berada pada range 30 hingga 37 (°C). Range ini berada dalam kondisi mesofilik dimana suhu berkisar antara 20-45 (°C). Pada awal proses *co-composting* suhu dalam reaktor berkisar antara 31-35 (°C) dimana kecenderungan suhu dalam reaktor dengan bahan baku campuran kompos dan variasi penambahan surfaktan 4% relatif lebih tinggi. Suhu paling tinggi yaitu pada reaktor K0S4 yaitu 35 °C. Reaktor ini berisi campuran tanah terkontaminasi dengan sampah segar dan penambahan surfaktan 4%. Sedangkan suhu paling rendah yaitu pada reaktor TS4 yang berisi tanah 100% dengan penambahan surfaktan 4%. Perbedaan suhu awal dalam reaktor cenderung dipengaruhi oleh volume bahan kompos dalam reaktor. Hal ini didasarkan pada kemampuan bahan kompos dalam reaktor untuk menahan panas sehingga tidak terlepas ke udara. Volume bahan kompos yang lebih besar cenderung memiliki suhu lebih panas jika dibandingkan dengan reaktor dengan volume bahan kompos yang lebih kecil.

Selama proses *co-composting*, bahan organik dalam bahan kompos akan diuraikan oleh mikroorganisme menghasilkan uap air, CO₂, humus, NH₃, SO₄²⁻, dan energi panas (Theresa *et al.*, 2007). Adanya pelepasan panas dalam proses *co-composting* sebagai indikasi adanya aktivitas metabolisme oleh mikroorganisme. Reaksi yang terjadi pada proses pengomposan aerobik yaitu:



Pada awal proses *co-composting* aktivitas mikroorganisme meningkat dengan cepat yang ditunjukkan oleh peningkatan suhu dalam reaktor. Pada hari ke-2 pengamatan, suhu dalam reaktor mencapai suhu maksimumnya yaitu 37°C pada reaktor K0S4. Dilanjutkan dengan suhu yang relatif sama (stagnan) pada hari ke-3 hingga hari ke-10. Pada hari ke-10 hingga hari ke-15 suhu dalam reaktor kembali meningkat dengan suhu maksimum 36°C pada reaktor K0S4. Pada fase 15 hari pertama merupakan fase

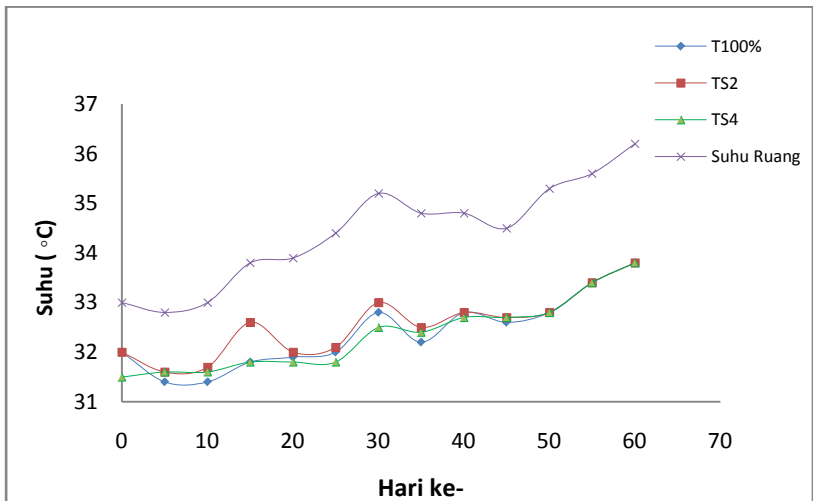
aktif. Meningkatnya suhu sebagai dampak meningkatnya aktivitas mikroorganisme dan jumlah populasi dari mikroorganisme dalam reaktor sehingga dekomposisi bahan organik berjalan cepat dan panas yang dihasilkan juga semakin besar. Peningkatan suhu reaktor pasca hari ke-10 juga dipengaruhi dari pengadukan bahan kompos yang dilakukan.

Pengadukan bahan kompos dilakukan bertujuan untuk meratakan kondisi fisik (suhu, kelembapan) dan kimia (nutrien) dalam reaktor. Menurut Antizar-Ladislao (2005), fase mesofilik di awal proses *co-composting* menjadi sangat penting karena merupakan fase pertumbuhan bakteri secara massif. Kondisi ini sangat penting karena diharapkan dapat terjadi proses degradasi senyawa organik termasuk PAH oleh mikroorganisme. Dari hasil penelitiannya (Antizar-Ladislao, 2005) merekomendasikan agar menjaga suhu reaktor pada kondisi mesofilik (suhu optimum =38°C) selama enam minggu pertama. Sedangkan pada range suhu 40–42 (°C) merupakan kondisi maksimum bagi pertumbuhan mikroorganisme dengan tingkat diversitas tinggi.

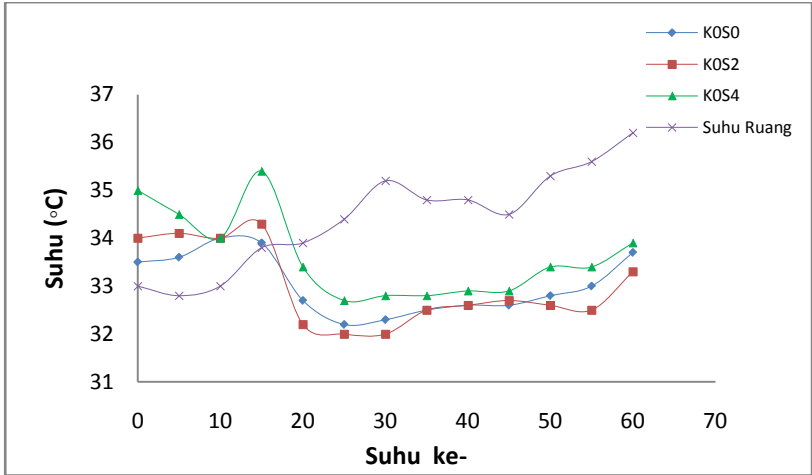
Setelah hari ke-15, suhu dalam masing-masing reaktor berangsur-angsur menurun dan kembali naik mengikuti pola suhu ruang. Dalam fase ini, terjadi proses pematangan kompos dimana terjadi pembentukan humus tanah. Pada kondisi pola suhu dalam reaktor sama dengan pola suhu ruang, maka kompos telah stabil. Jika melihat dari segi kematangan kompos, maka dapat dilihat rentang waktu masing-masing kompos yang berbeda untuk mencapai fase stabil. Reaktor dengan campuran sampah segar (KOS0, KOS2, dan KOS4) membutuhkan waktu lebih lama jika dibandingkan dengan reaktor berbahan kompos setengah jadi (K1/2S0, K1/2S2, dan K1/2S4) dan kompos jadi (K1S0, K1s2, dan K1S4). Waktu yang dibutuhkan reaktor dengan campuran sampah segar, kompos setengah jadi, dan kompos jadi untuk mencapai fase stabil secara berturut-turut adalah 30 hari, 20 hari dan 5 hari. Sedangkan pola suhu dalam reaktor kontrol (T100%, TS2, dan TS4) selalu mengikuti pola dalam ruang.

Mikroorganisme yang muncul pada fase ini adalah bakteri, jamur, dan *Actinomycetes* yang mendegradasi bahan organik dari kelompok selulosa, hemiselulose, dan lignin (Wulandari, 2014). Dari hasil pengamatan suhu reaktor secara aktual, suhu dalam reaktor tidak mencapai suhu optimum untuk pertumbuhan

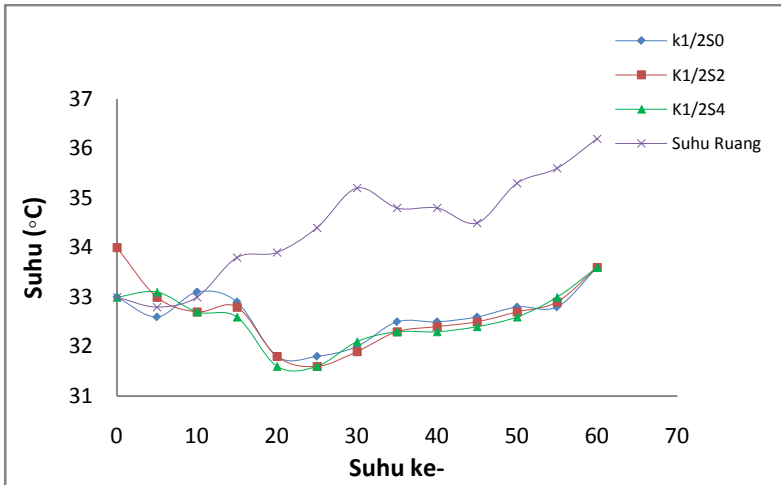
mikroorganismenya. Rendahnya suhu dalam reaktor disebabkan volume reaktor yang sangat kecil sehingga sulit menahan panas yang dihasilkan dari proses metabolisme mikroorganismenya. Hal ini sesuai dengan penelitian Zhang *et al.* (2011) yang mengungkapkan bahwa aplikasi komposting dengan skala kecil tidak disarankan karena masa organik dalam reaktor tidak cukup untuk mencapai kondisi termofilik dan menjaga suhu tetap konstan dalam periode yang cukup lama. Selain itu, adanya aerasi dengan udara lembab yang diinjeksi ke dalam bahan kompos menjadikan suhu dalam reaktor cenderung lebih rendah dari suhu ruang. Setelah hari ke-20, suhu dalam reaktor cenderung stagnan dibawah suhu ruangan dan fluktuasinya mengikuti suhu ruangan.



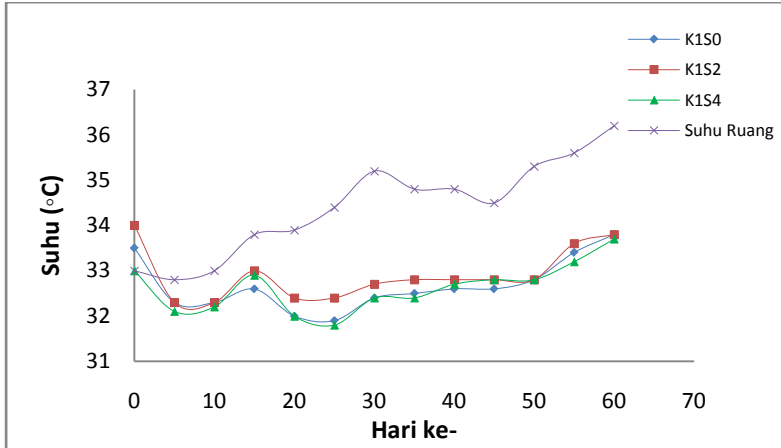
Gambar 4.3 Pola Suhu Reaktor T100%; TS2; TS4; dan Suhu Ruang



Gambar 4.4 Pola Suhu Reaktor K0S0; K0S2; K0S4; dan Suhu Ruang



Gambar 4.5 Pola suhu Reaktor K1/2S0; K1/2S2; K1/2S4; dan Suhu Ruang



Gambar 4.6 Pola Suhu Reaktor K1S0; K1S2; K1S4; dan Suhu Ruang

4.2.2 Analisis pH

Parameter pH dianalisis setiap 5 hari sekali dan dilakukan selama 60 hari. Cara pengukuran pH bahan kompos dilakukan dengan menancapkan *probe* alat iTuin ke dalam bahan kompos hingga nilai pH yang muncul pada monitor stabil. Pada awal proses *co-composting* nilai pH bahan baku campuran kompos berada pada range 5 hingga 7. Bahan campuran kompos dengan campuran sampah segar memiliki pH cenderung rendah jika dibandingkan dengan bahan campuran kompos lainnya. Hal ini dipengaruhi oleh kandungan senyawa organik dalam bahan kompos yang relatif tinggi sehingga memicu terbentuknya asam organik dalam bahan kompos. Sedangkan bahan campuran kompos yang terdiri dari tanah 100% memiliki pH netral yaitu 7. Hasil analisis nilai pH selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.7 hingga Gambar 4.10.

Pada proses *co-composting*, nilai pH perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap aktivitas mikroorganisme yang ada di dalamnya. Kondisi optimum pH untuk proses pengomposan berada pada range netral yaitu 6 - 8,5 (Mirwan, 2012). Pada kondisi tersebut, mikroorganisme seperti bakteri dan jamur dapat

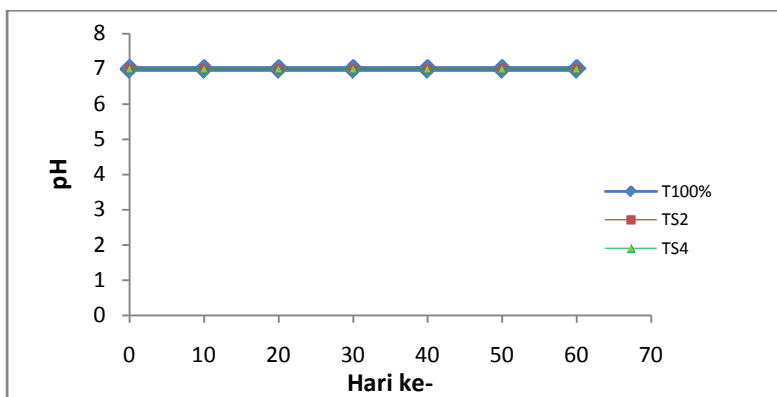
tumbuh secara optimum dalam bahan kompos. Sebaliknya kondisi pH yang terlalu asam ($\leq 4,5$) atau basa (9) akan menyebabkan ketidakseimbangan pada dinding sel bakteri dan merusak sel, yang selanjutnya mengganggu aktivitas mikroorganisme (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Dari hasil analisis nilai pH bahan kompos tidak terjadi fluktuasi yang signifikan. Nilai pH bahan kompos cenderung meningkat seiring lamanya waktu pengomposan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Abouelwafa (2008) yang mengemukakan bahwa pada proses pengomposan, bahan kompos akan membentuk senyawa alkali karena adanya pelepasan amonia selama hidrolisis senyawa organik seperti protein oleh bakteri.

Pada wal pengomposan terjadi proses hidrolisis bahan organik seperti lemak, protein, polisakarida, dan asam nukleat menjadi ikatan yang lebih sederhana seperti asam lemak monosakarida, asam amino, purin dan lain lain (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Saat proses dekomposisi terjadi, maka ikatan karbon akan diubah oleh mikroorganisme menjadi H_2O dan CO_2 . Sementara itu protein dalam bahan kompos akan mengalami deaminasi gugus amina ($-NH_2$) yang selanjutnya memebentuk senyawa NH_3 . Kandungan air dalam bahan kompos akan memicu terbentuknya ion NH_4 serta melepaskan ion OH^- . Dalam tahapan ini akan menyebabkan pH akan meningkat. Dari data hasil analisis pH selama proses komposting, nilai pH bergerak naik dari nilai terendah 5 hingga menjadi 8 pada minggu ke 5.

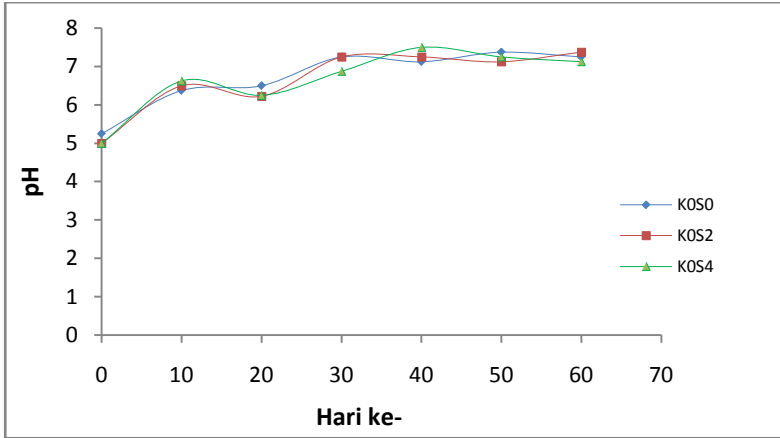
Berdasarkan hasil penelitian ini diketahui bahwa reaktor dengan bahan kompos sampah segar membutuhkan waktu sekitar 25 hari untuk mencapai pH 7.5. Hal ini disebabkan kandungan bahan organik dalam bahan kompos yang melimpah sehingga butuh waktu lebih lama oleh mikroorganisme untuk mendegradasinya. Pada pH kisaran 7,5, kompos dianggap telah masuk ke tahap pematangan dan aman digunakan sebagai *conditioner* bagi tanah. Sedangkan reaktor dengan bahan kompos sampah setengah jadi dan kompos jadi membutuhkan waktu lebih singkat untuk mencapai pH 7,5. Reaktor K1/2S dan K1S berturut-turut membutuhkan waktu 15 hari dan 5 hari. Kondisi ini sesuai dengan jumlah kandungan bahan organik dalam masing-masing bahan kompos. Sedangkan reaktor dengan bahan baku 100% tanah memiliki pH tetap. Hal ini

disebabkan kandungan senyawa organik dalam tanah yang relatif sedikit sehingga aktivitas mikroorganisme di dalamnya tidak menunjukkan fluktuasi pH. Hal ini didukung oleh penelitian Fauzi (2008), yang mengungkapkan bahwa kandungan karbon organik dan nitrogen ditanah sangat rendah dengan konsentrasi masing-masing 0,73% dan 0,05%.

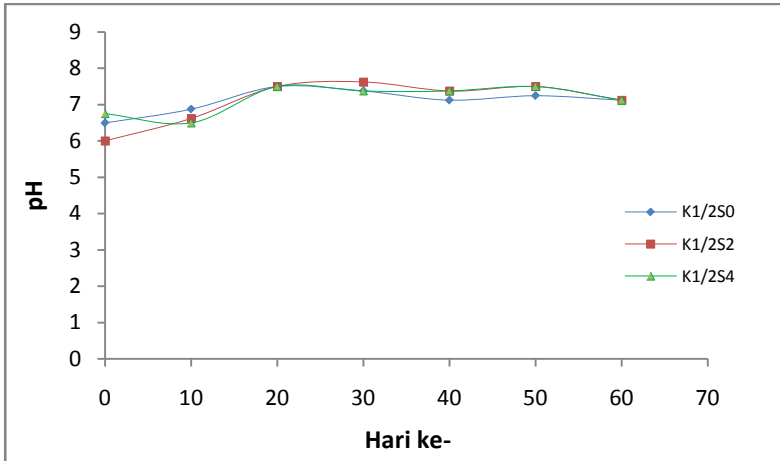
Selanjutnya aktivitas digester senyawa organik oleh mikroorganisme dalam bahan kompos juga akan menghasilkan asam organik yang terakumulasi sehingga terjadi penurunan pH. Pada tahap ini terjadi proses nitrifikasi dimana mikroorganisme yaitu bakteri *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, dan *Nitrobacter* akan mengoksidasi amonium menjadi senyawa nitrit dan nitrat. Pada proses ini akan memicu terjadinya pelepasan ion H⁺ yang menyebabkan penurunan pH (Mirwan, 2012). Hal ini sesuai dengan data hasil pengukuran dimana pada hari ke-40 adanya kecenderungan penurunan pH pada masing-masing reaktor kecuali tanah 100%. Adanya penurunan pH dalam kompos mendorong tumbuhnya jamur dalam kompos khususnya jamur yang bersifat lignolitik. Adanya asam organik dalam bahan kompos juga mempercepat proses degradasi senyawa lignin dan selulosa selama proses komposting. Di akhir proses komposting, penurunan pH sebagai indikasi terjadinya pembentukan asam humat yang berperan sebagai buffer tanah.



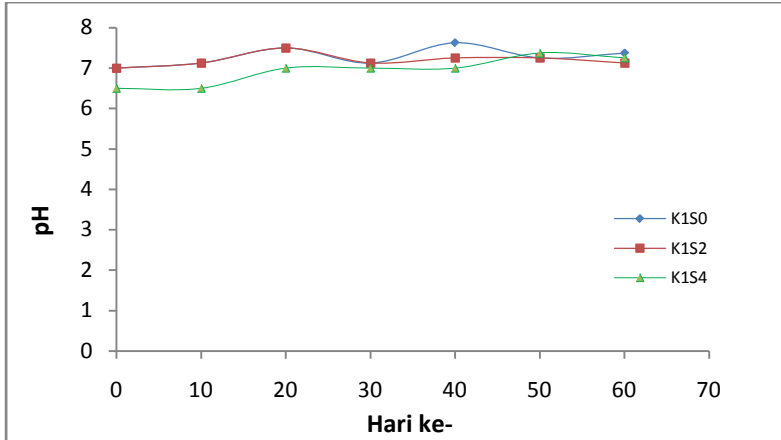
Gambar 4.7 Pola pH reaktor T100%; TS2; dan TS4



Gambar 4.8 Pola pH reaktor K0S0; K0S2; dan K0S4



Gmabar 4.9 Pola pH reaktor K1/2S0; K1/2S2; dan K1/2S4



Gambar 4.10 Pola pH reaktor K1S0; K1S2; dan K1S4

4.2.3 Analisis Kadar Air

Parameter kadar air dianalisis setiap 5 hari sekali. Data hasil analisis kadar air dalam reaktor selengkapnya pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.15. Pada awal proses komposting, kadar air bahan kompos masing-masing dikondisikan 50-60% sesuai dengan kondisi optimum pengomposan. Pengondisian bahan kompos dilakukan dengan penjemuran bahan kompos dengan kadar air >70% dan sebaliknya menambahkan air (aquades) terhadap bahan kompos dengan kadar air <50% (Bertoldi *et al.*, 1996). Penambahan aquades disebabkan sifat kimianya yang bebas dari zat pengotor dan mineral lainnya yang dapat mempengaruhi proses komposting.

Kondisi awal kompos setengah jadi memiliki kadar air tinggi (>70%) sedangkan tanah terkontaminasi memiliki kadar air awal yang rendah (<40%). Hal ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik bahan kompos. Bahan kompos dengan campuran 100% tanah memiliki *field capacity* yang sangat rendah. Sebaliknya, bahan kompos dengan campuran sampah segar, kompos setengah jadi atau kompos jadi memiliki *field capacity* besar. *Field capacity* merupakan kemampuan bahan kompos untuk

menahan kelembapan, dan biasanya nilai *field capacity* sampah *biodegradable* >30% (Efendi, 2012).

Dari data hasil pengamatan secara aktual, kadar air dalam masing-masing reaktor cenderung meningkat pada 10 hari pertama sebagai akibat dari pertumbuhan mikroorganisme yang cukup pesat dalam reaktor. Kadar air rata-rata dalam masing-masing reaktor mencapai 60% hingga 70% kecuali pada reaktor dengan campuran 100% tanah. Pada Gambar 4.11 dapat dilihat kondisi kadar air bahan kompos sebelum dilakukan pengondisian yaitu berkisar antar 40%-50%. Namun setelah dilakukan pengondisian yaitu penambahan aquades, kadar air dalam masing reaktor naik hingga $\geq 50\%$. Sama halnya dengan reaktor K0S0 dan K0S2 yang dilakukan penambahan aquades (*rewatering*) pada minggu ke-6 dan 8, dimana kadar airnya sempat menurun hingga kurang dari 50%. Untuk menjaga kadar air dalam kompos tetap stabil pada kondisi optimum (50%-60%), kondisi kadar air tetap dikontrol pada setiap reaktor. Pada Gambar 4.11, 4.13, dan 4.14, garis putus putus vertikal merupakan saat dimana dilakukan pengondisian (*rewatering*) terhadap masing-masing reaktor.

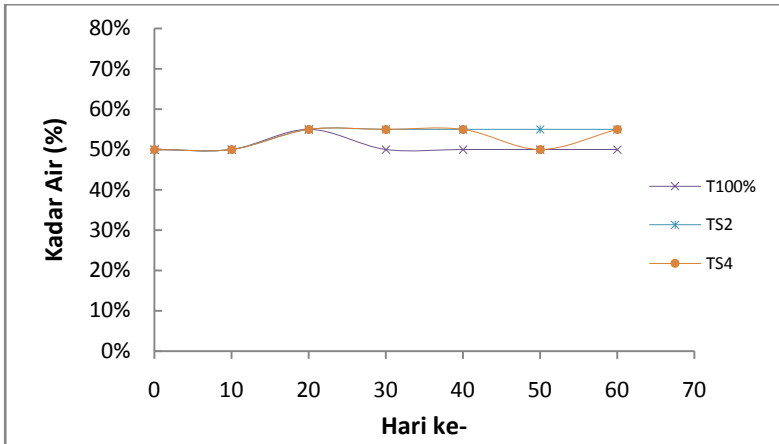
Pada pengamatan selanjutnya, kadar air dalam reaktor relatif turun dan stabil. Turunnya kadar air dalam masing-masing reaktor sangat dipengaruhi oleh kecilnya volume reaktor sehingga uap air yang dihasilkan dari proses metabolisme mikroorganisme cenderung teruapkan. Selain itu, aerasi secara kontinyu juga mempengaruhi menurunnya kadar air dalam reaktor. Suplai udara yang dihasilkan aerator mempercepat proses penguapan air (evaporasi) dalam kompos. Hal ini dibuktikan dengan bagian kompos yang berada disekitar lubang aerasi tampak lebih kering dari bagian lainnya.

Namun untuk mengurangi resiko penguapan yang lebih cepat, selang aerator dilewatkan melalui botol aquades sehingga udara yang diinjeksikan merupakan udara lembab. Hal ini sesuai dengan saran Robinson & Stentiford (1993) dalam penelitiannya yang mengungkapkan bahwa salah satu kontrol kelembapan yang baik adalah dengan memasukkan udara lembab ke dalam bahan kompos. Laju konsumsi aquades dalam proses aerasi sekitar 0,017 L/hari. Kondisi kadar air yang tidak merata dalam

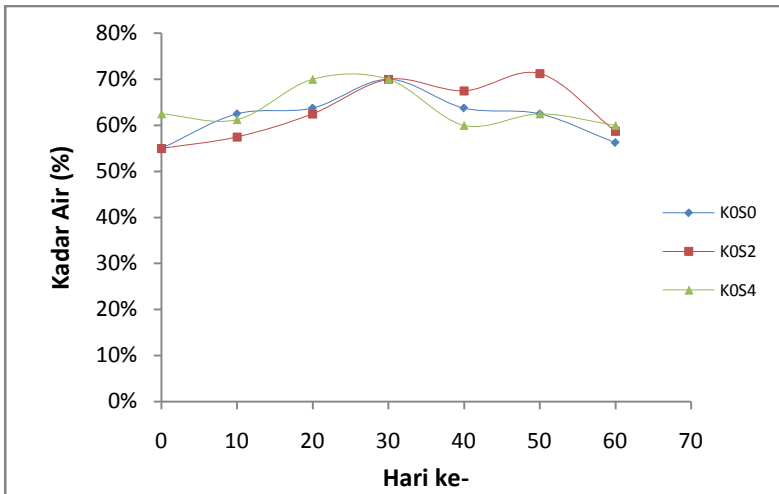
bahan kompos juga memerlukan perlakuan khusus seperti pengadukan secara rutin yang dilakukan setiap 10 hari sekali.

Kadar air dalam bahan kompos sangat penting dalam proses pengomposan, karena dapat mempengaruhi laju pertumbuhan mikroorganisme dalam kompos. Bahan kompos dengan kadar air optimum 50-60 (%) dapat mempercepat proses degradasi senyawa organik dalam kompos. Hal ini disebabkan kadar air pada range tersebut membantu mikroorganisme untuk memanfaatkan senyawa organik terlarut dalam bahan kompos. Sebaliknya, bahan kompos dengan kadar air rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat proses degradasi senyawa organik dalam kompos. Menurut Bertoldi *et al.* (1996), proses komposting akan berhenti jika kadar air dalam bahan kompos hanya berkisar $\leq 35\%$, karena akan terjadi pengawetan terhadap bahan kompos (sulit terdegradasi). Demikian halnya jika kadar air dalam bahan kompos sangat tinggi $\geq 80\%$ akan menghambat proses degradasi bahan organik, karena kadar air yang terlalu jenuh sehingga menyebabkan sirkulasi udara (O_2) dalam bahan kompos terhambat sehingga tercipta kondisi anaerobik.

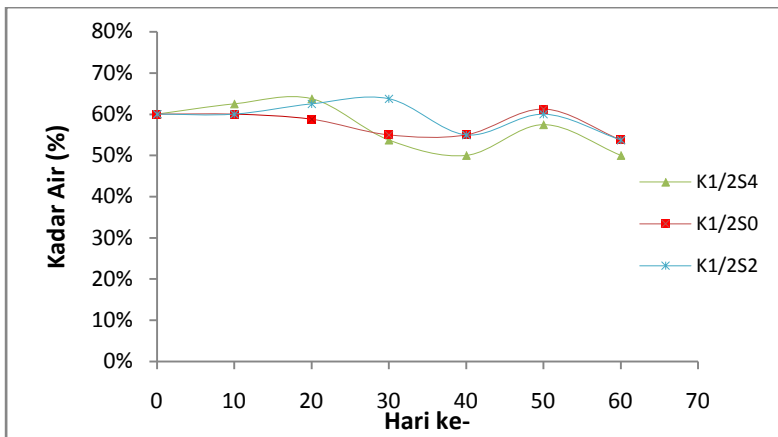
Dari Gambar 4.11 hingga Gambar 4.14, adanya pola peningkatan kadar air bahan kompos dari awal proses komposting hingga hari ke-20. Pada fase ini merupakan fase pertumbuhan mikroorganisme, karena ketersediaan nutrisi dalam bahan kompos masih cukup. Reaktor dengan komposisi bahan kompos tanah terkontaminasi-sampah segar memiliki kadar air yang paling tinggi diikuti dengan reaktor dengan komposisi tanah terkontaminasi-kompos setengah jadi, tanah-kompos jadi. Kadar air maksimum mencapai 80% dalam reaktor K0S2.2. Komposisi bahan kompos dengan sampah segar mampu mempertahankan kadar air tetap tinggi karena pertumbuhan mikroorganisme relatif tinggi dan volumenya juga relatif besar. Sebaliknya, reaktor dengan komposisi tanah 100% memiliki kadar air relatif rendah. Kadar air terendah mencapai 25% pada reaktor kontrol tanah 100%.



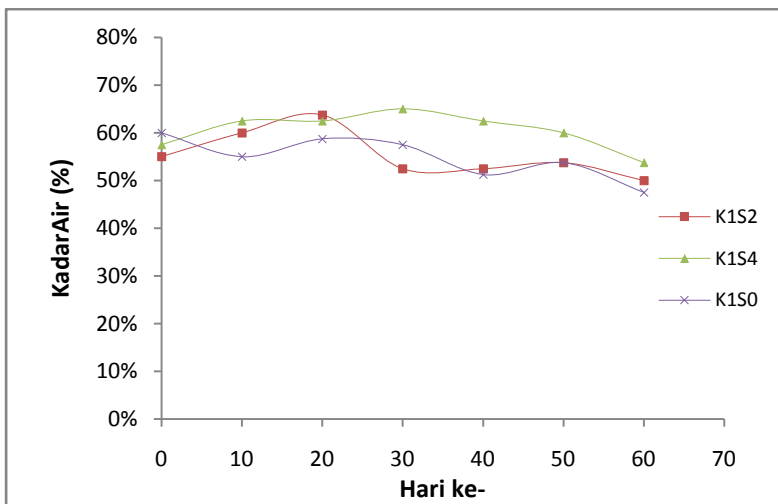
Gambar 4.11 Pola kadar air reaktor T100%; TS2; dan TS4



Gambar 4.12 Pola kadar air reaktor K0S0; K0S2; dan K0S4



Gambar 4.13 Pola kadar air reaktor K1/2S0; K1/2S2; dan K1/2S4



Gambar 4.14 Pola kadar air reaktor K1S0; K1S2; dan K1S4

4.2.4 Rasio C/N

Dalam penelitian ini dilakukan pengukuran rasio C/N pada awal dan akhir proses *co-composting*. Kandungan C-Organik dan N-Total sebagai indikator kecukupan nutrisi bagi pertumbuhan mikroorganisme dalam bahan kompos. Kandungan N-Total dalam bahan kompos meliputi kandungan N-Kjeldahl (TKN), Nitrit, dan Nitrat (PerMen. Pertanian No. 28 Tahun 2009). TKN merupakan kandungan nitrogen organik dan amonium (NH_4^+). Senyawa karbon dalam bahan kompos dimanfaatkan mikroorganisme dalam proses metabolisme untuk menghasilkan energi sedangkan senyawa nitrogen digunakan untuk pertumbuhan sel baru. Perubahan rasio C/N mengindikasikan tingkat degradasi bahan organik dalam bahan kompos.

Rasio C/N dari masing-masing bahan baku campuran kompos dianalisis seperti pada Tabel 4.2.

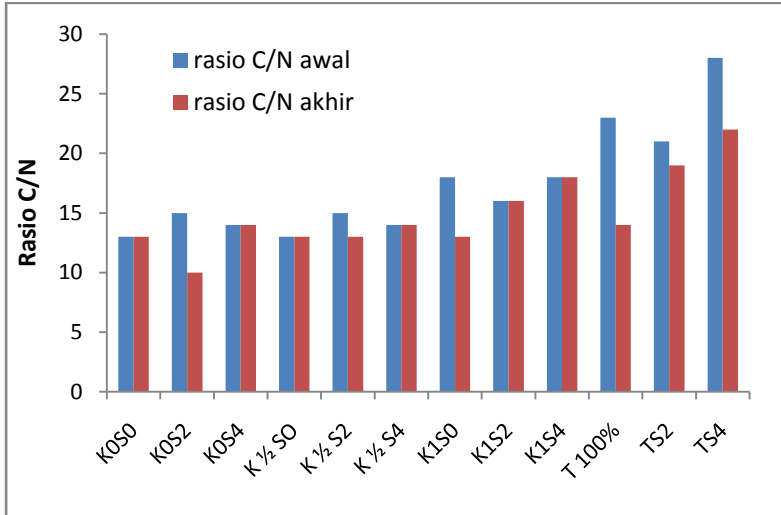
Tabel 4.2 Rasio C/N bahan baku campuran kompos

No	Bahan Baku Kompos	Rasio C/N
1	Sampah segar	16
2	Kompos setengah jadi	14
3	Kompos jadi	12

Rasio C/N bahan campuran kompos yang dijadikan sebagai co-substrat menurut Antizar-Ladislaos (2004) harus memenuhi range 15-30. Dari Tabel 4.2 diketahui, rasio C/N kompos setengah jadi dan kompos jadi kurang dari syarat minimum. Hal ini dipengaruhi oleh umur kompos dimana semakin lama proses komposting maka rasio C/N akan berkurang akibat terdegradasi selama proses komposting. Namun karena keterbatasan dalam penelitian ini, maka tetap menggunakan kompos setengah jadi dan kompos jadi sebagai co substrat dalam proses *co-composting*. Untuk meningkatkan rasio C/N dalam bahan baku kompos dapat dilakukan dengan pertimbangan pencampuran beberapa bahan. Seperti pada penelitian Zhang *et al.* (2011) yang mengungkapkan bahwa untuk mendapatkan bahan kompos dengan rasio C/N sekitar 30 perlu campuran dedaunan, ranting, dan sayur sayuran seperti kubis, bayam, dan seledri dengan jumlah secara berturut-turut adalah

60%, 28%, dan 12%. Selain itu, dapat juga dilakukan penambahan sekam padi yang mengandung karbon tinggi dan kotoran ternak yang mengandung nitrogen tinggi.

Analisis rasio C/N dalam bahan kompos dilakukan diawal (H-0) dan diakhir (H-60) proses *co-composting*. Hasil analisis rasio C/N dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Perbandingan rasio C/N bahan kompos awal dan akhir selama proses *co-composting*

Pada Gambar 4.16 dapat diketahui bahwa rasio C/N kompos awal berkisar antara 13-28. Rasio C/N tertinggi pada reaktor TS4 sedangkan terendah pada reaktor K0S0 dan K1/2S0. Reaktor dengan bahan kompos 100% tanah memiliki rata-rata rasio C/N lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor lainnya. Hal ini disebabkan kandungan N-total sebagai pembagi yang relatif kecil. Sebaliknya rata-rata rasio C/N reaktor dengan bahan kompos tanah terkontaminasi dan sampah segar justru yang paling rendah. Jika mempertimbangkan umur kompos yang ditambahkan maka hasil analisis rasio C/N awal sampel kurang dapat diterima. Hal ini disebabkan, bahan kompos dengan campuran sampah

segar yang masih kaya akan senyawa organik seharusnya memiliki rasio C/N lebih tinggi jika dibandingkan dengan bahan kompos lainnya. Dari Tabel 4.2 diketahui bahwa sampah segar, kompos setengah jadi, dan kompos jadi secara berturut-turut memiliki rasio C/N 16, 14, dan 12. Namun setelah ditambahkan tanah terkontaminasi sebagai bahan kompos dan surfaktan sebagai perlakuan, rasio C/N bahan kompos menjadi tidak sesuai dengan bahan kompos awal. Adanya perlakuan penambahan surfaktan diduga memberikan pengaruh terhadap rasio C/N bahan kompos, namun pengaruh belum dapat diketahui.

Rasio C/N ideal pada proses komposting adalah 15-40, dengan rasio optimum pada range 25-30. Kondisi rasio C/N yang terlalu tinggi mengakibatkan aktivitas biologis mikroorganisme akan terganggu dan bahan kompos akan membusuk secara perlahan lahan karena kekurangan nitrogen. Dalam kondisi kekurangan nitrogen, maka akan membutuhkan waktu lama untuk tercapainya pematangan kompos (Polprasert,1996). Sebaliknya, jika rasio C/N terlalu rendah maka akan menghambat proses dekomposisi bahan organik karena kekurangan karbon sebagai sumber energi (Addis, 2009). Selama proses *co-composting* rasio C/N 50% reaktor menurun dengan penurunan rasio C/N terbesar pada reaktor T100%. Sedangkan sisanya, rasio C/N bahan kompos tetap pada awal dan akhir proses *co-composting*. Rata-rata penurunan rasio C/N dalam masing-masing reaktor yaitu 12,04%. Adanya penurunan rasio C/N pada bahan kompos mengindikasikan adanya penurunan material organik selama proses *co-composting*. Sedangkan penurunan material organik dalam bahan kompos mengindikasikan adanya dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme selama proses *co-composting* (Mirwan, 2012). Rasio C/N dan konsentrasi C-Organik dan N-Total bahan kompos dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Pada awal proses *co-composting* konsentrasi N-total meningkat cepat bersamaan dengan konsentrasi fosfor dan kalium dalam bahan kompos. Konsentrasi amonium pada bahan kompos akan meningkat cepat pada minggu pertama proses *co-composting* karena adanya dekomposisi ikatan nitrogen kompleks seperti protein padabahan kompos.

Tabel 4.3 Rasio C/N masing-masing kompos

No	Kode Sampel	H-0			H-60		
		C-Organik (%)	N total (%)	C/N rasio	C-Organik (%)	N total (%)	C/N rasio
1	K0S0	8,61	0,67	13	9,46	0,71	13
2	K0S2	10,01	0,66	15	8,60	0,87	10
3	K0S4	10,90	0,77	14	10,90	0,77	14
4	K ½ S0	9,31	0,71	13	10,87	0,81	13
5	K ½ S2	10,52	0,71	15	10,71	0,84	13
6	K ½ S4	9,99	0,69	14	10,63	0,77	14
7	K1S0	11,39	0,62	18	12,36	0,97	13
8	K1S2	11,51	0,73	16	14,13	0,86	16
9	K1S4	11,23	0,63	18	11,23	0,63	18
10	T 100%	9,97	0,43	23	5,66	0,41	14
11	TS2	9,97	0,47	21	8,65	0,46	19
12	TS4	9,85	0,35	28	10,12	0,45	22

Indikasi tingginya konsentrasi amonium pada bahan kompos ditunjukkan oleh peningkatan pH secara cepat (puncak mencapai 8). Peningkatan konsentrasi N-Total dapat dilihat pada Tabel 4.3, dimana rata-rata kenaikan konsentrasi N-Total bahan kompos mencapai 0,01 mg/kg setelah 60 hari. Selanjutnya kandungan amonium akan diubah menjadi nitrat dalam proses nitrifikasi. Proses nitrifikasi dapat terjadi pada reaktor aerobik seperti halnya pada kondisi anaerobik karena tingginya kadar air dan BOD dalam bahan kompos (Tiquia & Vrijmoed in Bertoldi *et al.*, 1996).

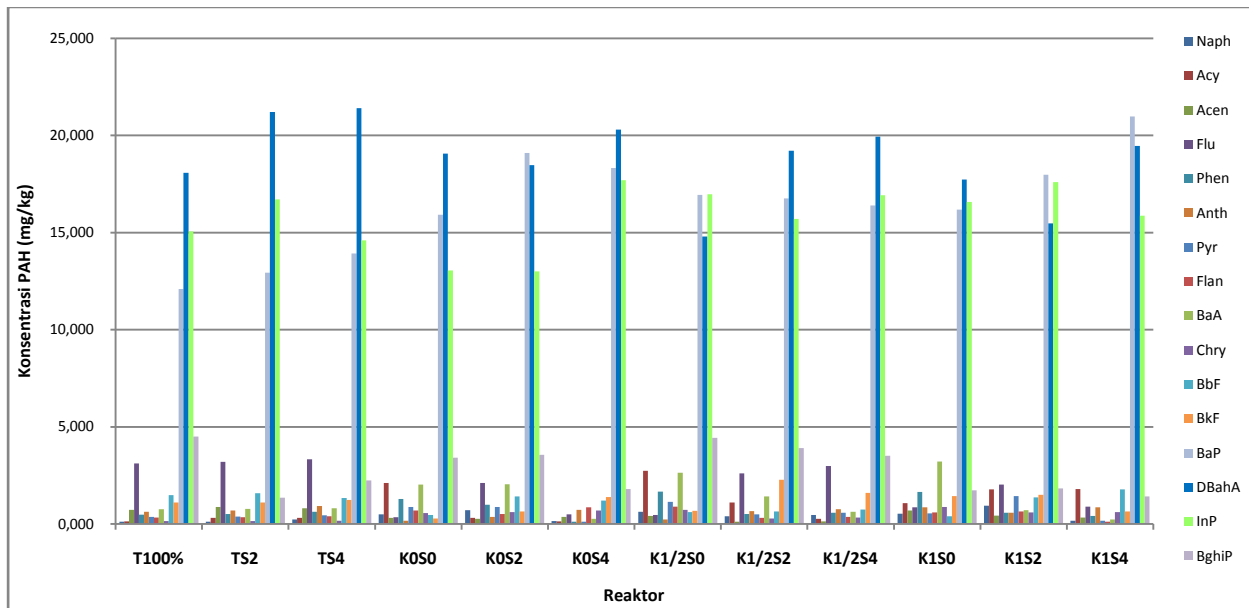
Sebaliknya, konsentrasi karbon pada bahan kompos akan menurun drastis pada minggu pertama selama proses *co-composting*. Hal ini sebagai indikasi aktifnya mikroorganisme yang mengoksidasi karbon menjadi CO₂. Namun jika melihat data hasil analisis pada Tabel 4.3, konsentrasi C-Organik dalam masing-masing reaktor cenderung meningkat kecuali pada reaktor K0S2, T100%, dan TS2. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya availabilitas C-organik dalam bahan baku sebagai hasil desorpsi (pelepasan kembali bahan organik terikat) dari matriks tanah (Atagana dkk., 2003). Sifat availabilitas senyawa organik sangat dipengaruhi oleh kelarutannya sehingga ada indikasi pengaruh penambahan surfaktan terhadap konsentrasi C-Organik dalam bahan kompos.

4.3 Biodegradasi PAH Selama Proses *Co-composting*

4.3.1 Konsentrasi PAH dalam Bahan Baku *Co-Composting*

Proses *co-composting* telah banyak dibuktikan mampu mereduksi kandungan PAH dalam tanah terkontaminasi dengan memanfaatkan mikroorganisme dalam proses degradasinya. Hasil analisis konsentrasi PAH awal (H-0) pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.16. Hasil analisis menunjukkan bahwa 16 jenis senyawa PAH yang diprioritaskan US-EPA terdeteksi pada masing-masing reaktor. Konsentrasi PAH rata-rata pada awal proses *co-composting* adalah 64 ± 5 mg/kg, dengan konsentrasi tertinggi pada reaktor K1/2S2 (66,45 mg/kg) dan konsentrasi terendah pada reaktor kontrol (59,10 mg/kg). Konsentrasi ini jauh melampaui baku mutu yang ditetapkan oleh US-EPA yaitu sebesar 1 mg/kg.

Konsentrasi PAH awal pada reaktor kontrol lebih rendah dari reaktor dengan tambahan perlakuan. Rata-rata konsentrasi PAH awal pada ketiga reaktor kontrol (T100%, TS2, dan TS4) adalah 61,36 mg/kg. Konsentrasi rata-rata PAH awal pada reaktor dengan campuran sampah segar (K0S0, K0S2, dan K0S4) adalah 63,55%. Konsentrasi reaktor dengan campuran kompos setengah jadi (K1/2S0, K1/2S2, dan K1/2S4), dan reaktor dengan campuran kompos jadi (K1S0, K1S2, dan K1S4) secara berturut-turut adalah 63,55; 66,18; dan 65,37 mg/kg. Konsentrasi PAH pada reaktor dengan penambahan kompos lebih tinggi jika dibandingkan dengan reaktor kontrol. Hal ini disebabkan oleh kandungan PAH alami yang tergantung pada sampah segar (Zhang et al., 2011). Lovasari (2015) mengungkapkan bahwa kandungan PAH dalam sampah segar mencapai 3,43 mg/kg. Persentase senyawa PAH pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada Tabel 4.4.



Gambar 4.16 Konsetrasi PAH awal (H-0) pada masing-masing reaktor

Tabel 4.4 Konsentrasi PAH pada masing masing reaktor (H-0)

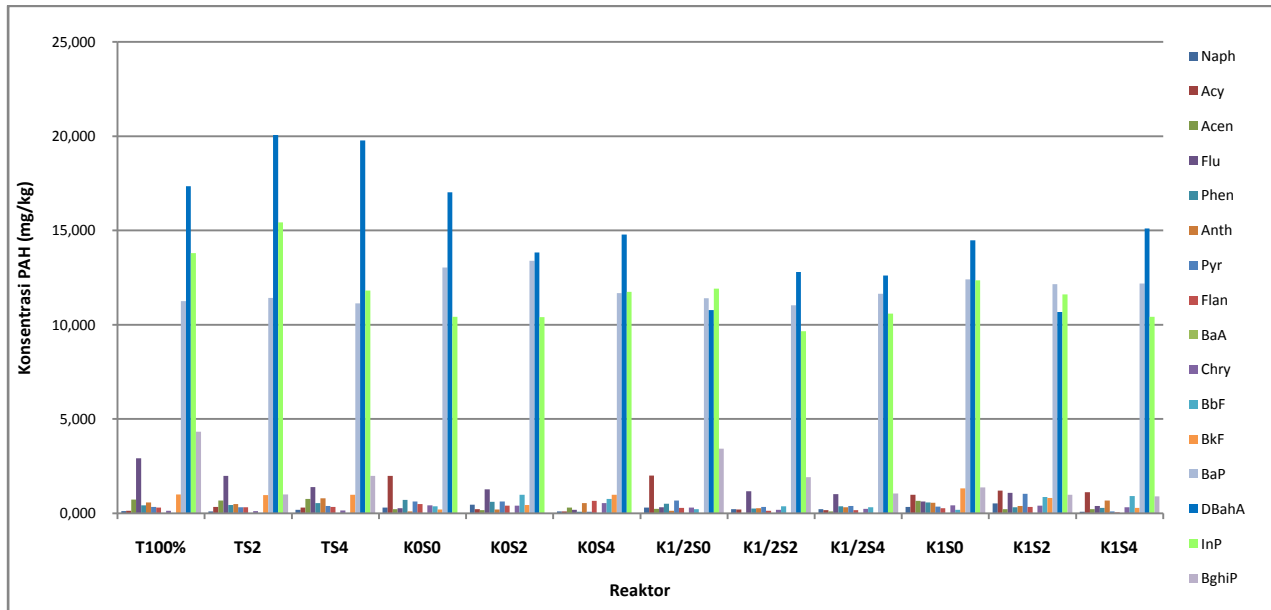
No	PAH	Reaktor											
		T100%	TS2	TS4	K0S0	K0S2	K0S4	K1/2S0	K1/2S2	K1/2S4	K1S0	K1S2	K1S4
1	Naphthalene	0,12	0,12	0,23	0,49	0,70	0,15	0,62	0,40	0,46	0,52	0,93	0,16
2	Acenaphthylene	0,13	0,31	0,32	2,11	0,31	0,13	2,74	1,11	0,27	1,08	1,78	1,80
3	Acenaphthene	0,72	0,88	0,80	0,31	0,27	0,36	0,41	0,12	0,14	0,69	0,43	0,33
4	Fluorene	3,11	3,19	3,33	0,35	2,11	0,50	0,46	2,61	2,98	0,85	2,02	0,89
5	Phenanthrene	0,47	0,51	0,63	1,28	0,98	0,12	1,67	0,51	0,58	1,65	0,57	0,42
6	Antracence	0,63	0,69	0,92	0,17	0,36	0,73	0,22	0,66	0,76	0,86	0,58	0,86
7	Pyrene	0,36	0,38	0,45	0,88	0,88	0,11	1,14	0,50	0,57	0,55	1,44	0,16
8	Fluoranthene	0,33	0,34	0,39	0,69	0,51	0,86	0,89	0,31	0,36	0,60	0,64	0,12
9	Benzo-a-anthrace	0,76	0,77	0,81	2,02	2,04	0,81	2,63	1,42	0,62	3,22	0,70	0,23
10	Chrysene	0,14	0,14	0,16	0,56	0,61	0,68	0,73	0,28	0,32	0,87	0,59	0,61
11	Benzo-b-fluorentene	1,48	1,58	1,34	0,47	1,42	1,21	0,61	0,65	0,74	0,39	1,37	1,78
12	Benzo-k-fluorentene	1,10	1,11	1,24	0,28	0,65	1,39	0,67	2,28	1,60	1,44	1,49	0,65
13	Benzo-a-pyrene	12,09	12,94	13,92	13,92	19,11	18,32	16,94	16,76	16,40	16,18	17,98	20,99
14	Dibenzo-ah-	18,07	21,22	21,41	21,41	18,47	20,31	14,80	19,21	19,94	17,73	15,48	19,46
15	Indeno 123, cd-	15,06	16,71	14,60	14,60	13,01	17,69	16,97	15,70	16,93	16,58	17,61	15,87
16	Benzo-ghi-perylene	4,50	1,35	2,25	2,25	3,55	1,79	4,43	3,91	3,51	1,74	1,83	1,42
TOTAL		59,07	62,22	62,80	61,07	64,99	64,61	65,93	66,44	66,18	64,95	65,44	65,73

Pada awal proses *co-composting*, konsentrasi PAH didominasi oleh PAH rantai panjang seperti *benzo[a]pyrene*, *dibenzo[a,h]anthracene*, dan *indeno[1,2,3-cd]pyrene*. Dari Tabel 4.4 diketahui bahwa persentase senyawa *benzo[a]pyrene*, *dibenzo[a,h]anthracene*, dan *indeno[1,2,3-cd]pyrene* secara berturut-turut adalah 26 % (16,46 mg/kg), 29 % (18,76 mg/kg), dan 25 % (15,82 mg/kg). Sisanya sebanyak 8,03% merupakan senyawa PAH rantai pendek (*naphthalene*, *acenaphthylene*, *acenaphthene*, *fluorene*, *anthracene*, dan *phenanthrene*) dan 4,49% merupakan senyawa PAH rantai sedang (*fluoranthene*, *pyrene*, *benzo[a]anthracene*, dan *chrysene*). Faktor penyebab tingginya konsentrasi PAH rantai panjang karena sumber tanah terkontaminasi yang digunakan merupakan sumber pencemar pirogenik (terbentuk dari proses alami). Sumber PAH pirogenik dari batu bara sangat dipengaruhi oleh tingkat kematangannya. Semakin matang suatu batu bara maka senyawa PAH yang terkandung di dalamnya akan memiliki susunan senyawa PAH yang lebih kompleks (Achten & Hoffmann, 2009)

4.3.2 Konsentrasi PAH Akhir Proses Co-Composting

Setelah 60 hari proses *co-composting*, dilakukan analisis konsentrasi PAH dalam masing-masing reaktor. Konsentrasi PAH akhir pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.17. Secara umum konsentrasi PAH akhir masih didominasi oleh senyawa PAH rantai panjang khususnya senyawa *benzo[a]pyrene* (25%), *dibenzo[a,h]anthracene* (32%), dan *indeno[1,2,3-cd]pyrene* (25%).

Tingginya konsentrasi PAH rantai panjang pada akhir *co-composting* mengindikasikan bahwa proses biodegradasi PAH rantai panjang membutuhkan waktu lama khususnya oleh mikroorganisme. Hal ini didukung oleh Winquist *et al.* (2013), dibutuhkan waktu 120 hari untuk mendegradasi 7% PAH rantai panjang pada proses *co-composting*. Selain itu, karakteristik PAH rantai panjang yang hidropobik dan toksik menjadikannya sangat lambat untuk didegradasi. Persentase rata-rata senyawa PAH pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada Tabel 4.5



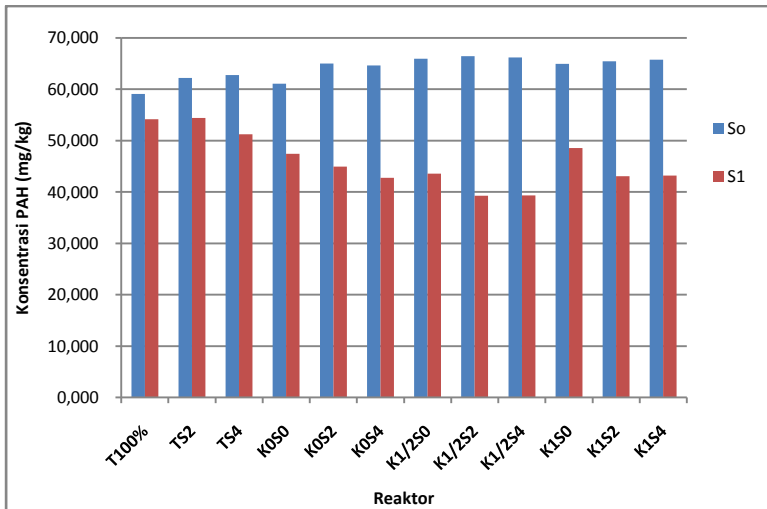
Gambar 4.17 Konsetrasi PAH akhir (H-60) pada masing-masing reaktor

Tabel 4.5 Konsentrasi PAH pada masing masing reaktor (H-60)

No	PAH	Reaktor											
		T100%	TS2	TS4	K0S0	K0S2	K0S4	K1/2S0	K1/2S2	K1/2S4	K1S0	K1S2	K1S4
1	Naphthalene	0,12	0,10	0,19	0,30	0,46	0,10	0,30	0,22	0,22	0,35	0,53	0,08
2	Acenaphthylene	0,13	0,33	0,30	1,99	0,21	0,10	2,00	0,20	0,17	0,98	1,21	1,12
3	Acenaphthene	0,72	0,68	0,76	0,21	0,17	0,30	0,23	0,02	0,10	0,67	0,22	0,23
4	Fluorene	2,92	1,98	1,39	0,27	1,28	0,19	0,32	1,16	1,01	0,63	1,09	0,39
5	Phenanthrene	0,43	0,45	0,54	0,72	0,61	0,08	0,51	0,26	0,38	0,58	0,32	0,28
6	Antracene	0,57	0,50	0,81	0,11	0,21	0,54	0,13	0,28	0,33	0,57	0,39	0,68
7	Pyrene	0,34	0,32	0,38	0,62	0,62	0,08	0,67	0,33	0,39	0,35	1,03	0,11
8	Fluoranthene	0,31	0,32	0,34	0,50	0,40	0,66	0,29	0,14	0,17	0,27	0,33	0,06
9	Benzo-a-anthracene	0,73	0,76	0,70	1,24	1,53	0,19	1,05	0,74	0,15	1,58	0,41	0,11
10	Chrysene	0,14	0,12	0,15	0,42	0,41	0,55	0,31	0,18	0,24	0,43	0,41	0,32
11	Benzo-b-fluorene	NF	NF	NF	0,37	0,98	0,77	0,22	0,37	0,32	0,19	0,86	0,92
12	Benzo-k-fluorene	1,00	0,97	0,98	0,21	0,44	0,99	NF	NF	NF	1,33	0,82	0,30
13	Benzo-a-pyrene	11,25	11,42	11,14	13,03	13,40	11,68	11,40	11,04	11,64	12,41	12,16	12,19
14	Dibenzo-ah-anthracene	17,35	20,06	19,77	17,02	13,84	14,79	10,77	12,79	12,61	14,48	10,67	15,11
15	Indeno 123, cd-pyrene	13,79	15,43	11,81	10,43	10,41	11,74	11,92	9,66	10,59	12,35	11,60	10,43
16	Benzo-ghi-perylene	4,33	1,00	1,98	NF	NF	NF	3,43	1,91	1,06	1,38	0,98	0,90
TOTAL		54,14	54,43	51,24	47,44	44,97	42,76	43,56	39,28	39,36	48,55	43,05	43,21

4.3.3 Reduksi Konsentrasi PAH Selama Proses *Co-composting*

Adanya perbedaan konsentrasi awal dengan konsentrasi akhir menunjukkan bahwa terjadi reduksi PAH dalam masing-masing reaktor. Perbedaan konsentrasi PAH awal dan akhir dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Konsentrasi PAH awal dan akhir pada masing-masing reaktor

Adanya reduksi konsentrasi PAH mengindikasikan terjadi proses degradasi PAH selama proses *co-composting* berlangsung. Proses degradasi senyawa PAH pada proses *co-composting* dapat melalui proses biologis dan fisik-kimia. Reduksi konsentrasi PAH paling optimal yaitu pada reaktor K1/2S2 dengan konsentrasi awal sebesar 66,45 mg/kg dan konsentrasi akhir sebesar 39,28 mg/kg. Hasil analisis menunjukkan bahwa reduksi PAH dalam masing-masing reaktor tidak terlalu signifikan antara PAH rantai pendek, rantai sedang, dan rantai panjang. Persentase reduksi PAH pada masing-masing reaktor seperti pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Persentase reduksi masing masing reaktor

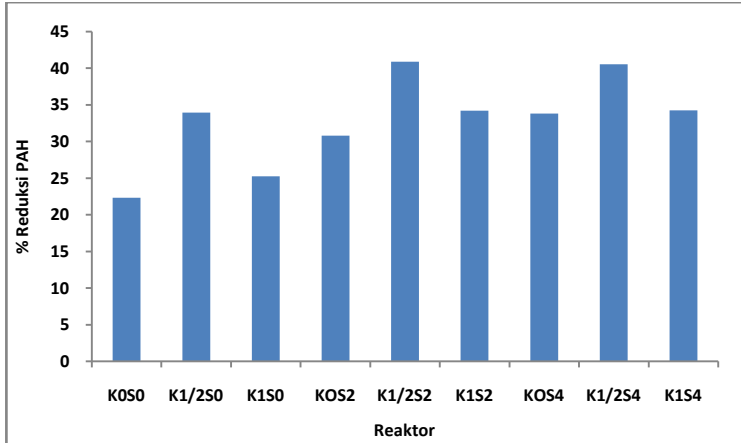
No	PAH	% Reduksi											
		T100%	TS2	TS4	K0S0	K0S2	K0S4	K1/2S0	K1/2S2	K1/2S4	K1S0	K1S2	K1S4
1	Naphthalene	2,0	19,0	16,1	39,0	34,9	31,6	52,1	45,9	51,9	33,8	43,0	48,7
2	Acenaphthylene	-1,5	-7,1	6,3	5,8	31,3	21,3	27,3	82,1	38,0	8,8	32,1	38,0
3	Acenaphthene	0,1	22,7	5,0	31,7	36,3	16,7	43,1	87,7	29,8	3,6	47,8	30,8
4	Fluorene	6,0	37,9	58,4	23,6	39,5	61,9	30,3	55,5	66,1	25,8	46,0	56,7
5	Phenanthrene	9,0	11,4	15,3	44,0	38,1	32,1	69,3	49,3	35,2	65,0	44,8	32,7
6	Antracence	9,0	27,9	12,3	35,5	42,1	25,3	41,5	58,6	56,4	34,3	31,8	20,8
7	Pyrene	4,7	15,1	15,2	29,1	29,4	23,7	40,9	33,9	32,6	35,4	28,2	32,6
8	Fluoranthene	4,3	6,8	12,8	27,7	22,1	22,6	67,5	56,5	52,7	54,5	47,5	49,9
9	Benzo-a-anthrace	3,4	1,4	13,3	38,5	25,0	29,1	60,1	47,7	76,4	50,8	41,1	53,7
10	Chrysene	4,3	17,1	7,3	24,4	32,7	20,2	57,2	35,0	24,0	50,7	31,6	46,8
11	Benzo-b-fluorentene	NF	NF	NF	21,1	30,8	36,6	64,1	43,1	57,3	50,5	37,1	48,0
12	Benzo-k-fluorentene	9,2	12,6	20,9	25,2	31,9	28,9	NF	NF	NF	7,4	44,9	54,4
13	Benzo-a-pyrene	7,0	11,7	20,0	18,1	29,9	36,2	32,7	34,2	29,0	23,3	32,4	41,9
14	Dibenzo-ah-anthracene	4,0	5,4	7,6	10,8	25,1	27,2	27,2	33,4	36,8	18,3	31,1	22,4
15	Indeno 123, cd-pyrene	8,4	7,7	19,1	20,1	20,0	33,6	29,8	38,5	37,4	25,5	34,1	34,3
16	Benzo-ghi-perylene	3,8	26,0	11,8	NF	NF	NF	22,5	51,2	69,8	20,7	46,6	36,8
	TOTAL	8,35	12,52	18,40	22,31	30,81	33,81	33,93	40,88	40,52	25,24	34,21	34,26

Pada Tabel 4.6 dapat diketahui bahwa secara umum tingkat reduksi PAH berada pada range 8,35% – 40,88%. Secara berturut-turut rata rata persentase reduksi PAH rantai pendek dan rantai sedang secara berturut turut adalah 33,04%; 32,02%, dan 29,05%. Senyawa PAH rantai pendek dan sedang cenderung lebih mudah didegradasi oleh mikroorganismenya karena ikatan rantai benzena yang tidak terlalu kuat. Tingkat degradasi PAH rantai pendek didominasi oleh *Fluoranthene* (42,30%) dan *Phenanthrene* (37,18%). Senyawa PAH rantai pendek dapat dimanfaatkan langsung sebagai sumber C oleh mikroorganismenya dalam proses metabolisme. Senyawa PAH rantai pendek juga memiliki sifat fotolisis dan volatil khususnya Naphthalene. Namun reduksi PAH rantai pendek sulit diprediksi karena selain mudah terurai namun secara bersamaan proses dekomposisi PAH rantai sedang dan panjang telah meningkatkan konsentrasi PAH rantai pendek sehingga terjadi akumulasi residu PAH rantai pendek (Antizar & Ladislao, 2005).

Rata-rata persentase reduksi PAH rantai panjang mencapai 29,05% dari konsentrasi awal. Persentase reduksi tersebut termasuk besar jika mempertimbangkan karakteristik PAH rantai panjang dan waktu *co-composting*. Senyawa PAH rantai panjang bersifat rekalsitran karena ikatan antar rantai benzena yang kuat dan kelarutan yang rendah (Antizar-Ladislao *et al.*, 2005) sehingga sulit terurai. Senyawa PAH rantai panjang juga diketahui memiliki sifat bioavailabilitas yang rendah dan bersifat toksik sehingga proses biodegradasi sangat terbatas (Zhang *et al.*, 2011). Tingginya reduksi PAH rantai panjang disebabkan oleh tingginya konsentrasi awal sehingga memicu degradasi oleh mikroorganismenya (Jorgensen *et al.*, 2000). Selain itu, kondisi asam pada awal proses *co-composting* merupakan stimulan yang baik untuk bakteri sehingga dapat mendegradasi PAH rantai panjang (Gennediev, 2013).

4.3.1 Pengaruh Penambahan Variasi Umur Kompos Terhadap Degradasi PAH Pada Metode *Co-Composting*

Persentase reduksi PAH pada masing-masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Tingkat reduksi PAH pada hari ke-60

Pada Gambar 4.19 diketahui bahwa reaktor dengan penambahan kompos setengah jadi memiliki persentase reduksi PAH paling optimum dibandingkan dengan reaktor lain. Reduksi PAH pada reaktor K1/2S0, K1/2S2, dan K1/2S4 secara berturut-turut adalah 34,93; 40,88; dan 40,52 %. Sedangkan tingkat reduksi PAH terendah yaitu pada reaktor K0S0 yang hanya mencapai 22,31%. Reaktor dengan campuran sampah segar yaitu K0S0, K0S2, dan K0S4 secara berturut-turut mampu mereduksi PAH sebesar 22,31; 30,81; dan 33,81 %. Begitu juga pada reaktor dengan campuran kompos jadi yaitu K1S0, K1S2, dan K1S4, secara berturut-turut mampu mereduksi konsentrasi PAH sebesar 25, 34, dan 34 %.

Hasil analisis menunjukkan bahwa reaktor dengan campuran kompos setengah jadi (K1/2S0; K1/2S2 dan K1/2S4) memiliki tingkat reduksi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan reaktor lainnya. Faktor utama tingginya tingkat reduksi PAH pada reaktor dengan campuran kompos setengah jadi karena sifat fisik kimianya. Kompos setengah jadi memiliki karakteristik yang berbeda dari sampah segar dan kompos jadi.

Tingkat kematangan kompos setengah jadi memiliki kandungan senyawa organik yang cukup bagi pertumbuhan mikroorganisme. Selain itu kompos setengah jadi juga memiliki

kandungan zat humus yang melimpah yang menjadikannya sebagai media yang ideal bagi mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa PAH. Selain itu, pada kompos setengah jadi dimungkinkan mikroorganisme telah memproduksi biosurfaktan yang selanjutnya dimanfaatkan untuk proses emulsi senyawa PAH. Perbedaan karakteristik bahan kompos mengakibatkan mekanisme degradasi dalam masing-masing reaktor berbeda. Mekanisme degradasi PAH pada proses *co-composting* adalah mineralisasi, pengikatan (fiksasi), dan volatilisasi (Antizar-Ladislao, 2004).

Mineralisasi PAH dalam proses *co-composting*

PAH cenderung sulit didegradasi karena sifatnya yang toksik dan cenderung terikat dengan matriks tanah sehingga ketersediaan (availabilitas) PAH bagi mikroorganisme sangat terbatas. Cebron *et al.* (2013) mengungkapkan bahwa PAH yang tersedia bebas bagi mikroorganisme pada tanah terkontaminasi hanya 1%. Ketersediaan PAH bebas sangat dipengaruhi oleh desorpsi PAH dari matriks tanah/kompos. Kompos setengah jadi dan kompos jadi memiliki kandungan asam-asam organik (zat humus) yang tinggi yang berasal dari proses dekomposisi senyawa organik. Berbeda dengan sampah segar yang kaya akan kandungan organik (lignin dan selulosa) memang ideal untuk pertumbuhan mikroorganisme, namun keterbatasan zat humus dalam materi sampah segar diduga mengurangi laju biodegradasi PAH di dalamnya.

Kandungan zat humus dalam kompos setengah jadi dan kompos jadi dimungkinkan mampu meningkatkan laju mineralisasi PAH selama proses *co-composting*. Hal ini didukung oleh penelitian Bogan & Sullivan (2003); Conte *et al.* (2001); Haderlein *et al.* (2001); Laor *et al.* (1999); dan Antizar-Ladislao *et al.* (2004), penambahan asam humat mampu meningkatkan fraksi bioavailabilitas polutan hidropobik termasuk PAH.

Selain umur kompos, suhu juga berpengaruh terhadap proses mineralisasi senyawa PAH. Peningkatan suhu di atas 50°C (fase termofilik) pada proses *co-composting* akan meningkatkan laju desorpsi senyawa PAH oleh matriks tanah dan membantu mengubahnya ke dalam fase cair (Pignatello & Xing, 1996). Namun peningkatan suhu dimungkinkan tidak terlalu

berpengaruh, karena suhu selama proses *co-composting* berada pada range mesofilik (<40°C).

✚ Simbiosis mikroorganisme dalam proses biodegradasi PAH

Karakteristik ikatan senyawa PAH yang relatif kuat membutuhkan simbiosis antar mikroorganisme dalam pemecahan rantai benzena PAH. Kompos setengah jadi, dengan umur 15 hari memiliki populasi mikroorganisme dengan diversitas yang tinggi. Keberagaman populasi dalam bahan kompos dimungkinkan mampu bersimbiosis untuk meningkatkan laju biodegradasi PAH. Menurut Zang *et al.* (2011), proses degradasi PAH akan terjadi sangat cepat dan nyata pada hari ke-14 pada proses *co-composting*. Hal ini disebabkan pada umur kompos diatas 10 hari, bahan kompos mulai ditumbuhi oleh jamur pelapuk putih (*Trametes versicolor*, *Bjerkandera sp*, dan *Pleurotus ostreatus*)(Antizar-Ladislao, 2004). Pada Gambar 4.20 dapat dilihat pertumbuhan jamur pada bahan kompos.



Gambar 4.20 Pertumbuhan jamur pada bahan kompos

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, kompos setengah jadi sangat ideal sebagai tempat tumbuhnya jamur karena proses dekomposisi bahan organik telah mencapai fase pematangan. Peran jamur dalam pemecahan ikatan rantai PAH didukung oleh penelitian Canet *et al.* (1999), jamur pelapuk yang tumbuh pada bahan kompos sangat potensial dalam mendegradasi PAH dalam

tanah. Jamur pelapuk putih diduga lebih efektif untuk memecah ikatan senyawa PAH terlebih dahulu sebelum dilanjutkan oleh bakteri. Jamur pelapuk akan mendekomposisi PAH rantai menengah hingga panjang. Hasil dekomposisi jamur menghasilkan residu senyawa PAH rantai pendek yang selanjutnya akan dimanfaatkan langsung oleh mikroorganisme sebagai sumber energi.

Uji statistik ANOVA: pengaruh variasi umur kompos terhadap biodegradasi PAH

Hipotesa awal pada analisis ANOVA:

H₁: ada pengaruh variasi umur kompos terhadap tingkat biodegradasi PAH.

H₀: tidak ada pengaruh variasi umur kompos terhadap tingkat biodegradasi PAH.

Tingkat kepercayaan ditentukan sebesar 95%, maka didapatkan nilai F hitung = 32,64 sedangkan nilai F tabel = 5,14. Nilai F hitung > F tabel maka H₀ ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi umur kompos yang ditambahkan mempengaruhi tingkat degradasi senyawa PAH di dalam masing-masing reaktor.

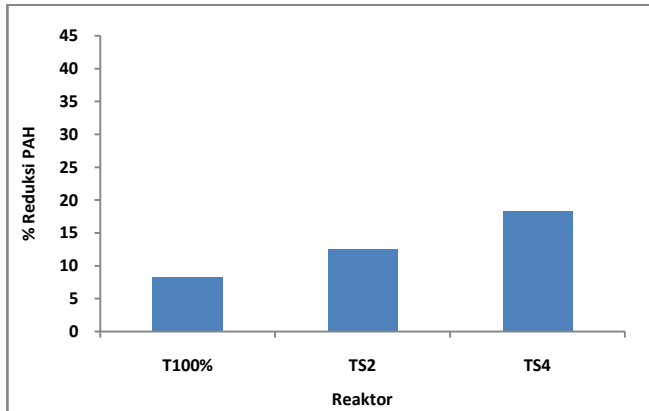
Selanjutnya uji signifikansi untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variasi umur kompos terhadap tingkat degradasi PAH.

- Pengaruh sampah segar terhadap tingkat degradasi PAH tidak signifikan dengan nilai $P > 0,05$ ($P = 0,096$).
- Pengaruh kompos setengah jadi terhadap tingkat degradasi PAH signifikan dengan nilai $P < 0,05$ ($P = 0,022$).
- Pengaruh kompos jadi terhadap tingkat degradasi PAH tidak signifikan dengan nilai $P > 0,05$ ($P = 0,062$).

4.3.2 Pengaruh Penambahan Surfaktan *Biodegradable* (Tween 80) Terhadap Degradasi PAH Pada Metode *Co-Composting*

✚ Tingkat degradasi PAH pada reaktor kontrol

Tingkat reduksi PAH pada reaktor kontrol dapat dilihat pada Gambar 4.21.



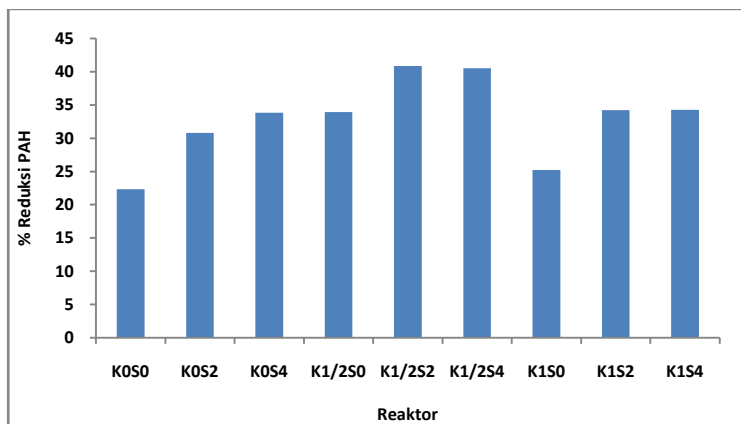
Gambar 4.21 Tingkat reduksi PAH pada masing-masing reaktor

Pada Gambar 4.21, diketahui bahwa tingkat reduksi pada reaktor kontrol (T100%, TS2, dan TS4) tergolong rendah (<20%). Tingkat reduksi PAH pada reaktor T100%, TS2, dan TS4 secara berturut-turut adalah 8,35; 12,52; dan 18,40 %. Rendahnya tingkat degradasi PAH pada reaktor kontrol disebabkan oleh karakteristik awal bahan kompos yang miskin senyawa organik. Hal ini terlihat dari reduksi senyawa PAH rantai pendek dan sedang yang sangat kecil di dalam reaktor kontrol. Padahal senyawa PAH rantai pendek seharusnya dapat langsung didegradasi oleh mikroorganisme. Bahkan pada senyawa *acenaphthylene* terjadi kenaikan konsentrasi PAH pada akhir proses *co-composting*. Selain itu, kadar air yang rendah (<50°) menjadikan bahan kompos dalam reaktor kontrol tidak ideal untuk pertumbuhan mikroorganisme.

Adanya perbedaan tingkat degradasi pada reaktor kontrol juga dipengaruhi oleh penambahan surfaktan. Konsentrasi surfaktan dalam reaktor kontrol berbanding lurus dengan tingkat degradasi PAH. Keberadaan PAH dalam bahan kompos mampu meningkatkan kelarutan PAH sehingga tersedia bagi mikroorganismenya. Selain itu, surfaktan Tween 80 dimungkinkan berperan sebagai sumber nutrisi (sumber C) bagi mikroorganismenya.

🚩 Efek surfaktan terhadap biodegradasi PAH

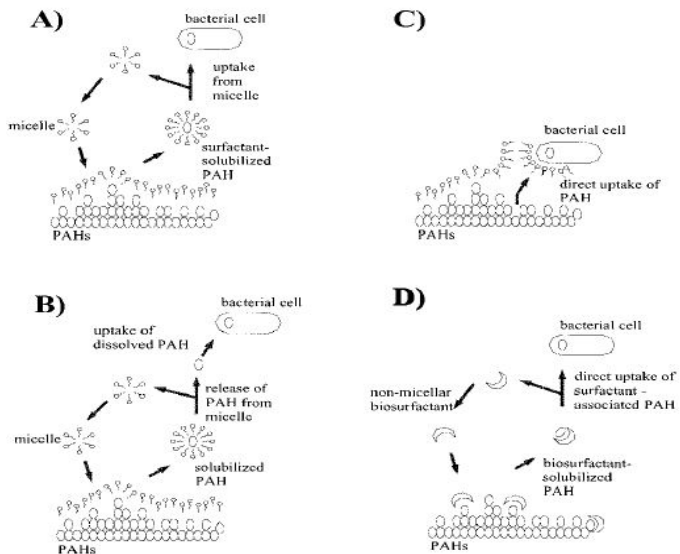
Tingkat reduksi PAH pada reaktor kontrol dapat dilihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Tingkat reduksi PAH pada masing-masing reaktor

Hasil analisis data menunjukkan bahwa pada reaktor dengan penambahan surfaktan 2% atau 4% memiliki tingkat reduksi PAH > 30% kecuali pada kontrol (TS2 dan TS4). Pada Gambar 4.25 diketahui adanya perbedaan tingkat reduksi PAH antara reaktor tanpa penambahan surfaktan dengan reaktor dengan penambahan surfaktan. Selisih tingkat reduksi PAH pada reaktor K0S4 dengan reaktor K0S0 mencapai 11%. Selisih tingkat reduksi PAH reaktor K1/2S4 - K1/2S0 dan reaktor K1S4 - K1S0 secara berturut-turut adalah 7% dan 9%.

Adanya selisih tingkat reduksi PAH mengindikasikan adanya pengaruh penambahan surfaktan terhadap tingkat degradasi. Keberadaan surfaktan dalam bahan kompos mampu meningkatkan kelarutan dari senyawa PAH sehingga dapat meningkatkan bioavailabilitas, mobilitas, dan biodegradasi senyawa PAH itu sendiri. Mekanisme peningkatan bioavailabilitas PAH seperti pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Mekanisme peningkatan bioavailabilitas PAH dengan penambahan surfaktan (Makkar & Rockne, 2003). Gambar (A) ketersediaan PAH secara langsung dari misel, (B) ketersediaan PAH dalam bentuk fase cair setelah terlepas dari misel, (C) ketersediaan langsung PAH melalui kontak langsung, dan (D) ketersediaan surfaktan tanpa melibatkan misel

Surfaktan mampu meningkatkan kelarutan PAH melalui penurunan tegangan permukaan antar fase (Makkar & Rockne, 2003). Selain itu, surfaktan juga mampu membentuk emulsi pada permukaan senyawa PAH sehingga mikroorganisme dapat melekat. Tidak hanya dapat meningkatkan kelarutan dan

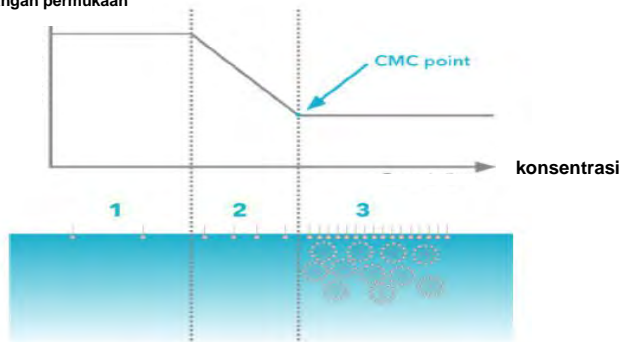
membentuk emulsi, penambahan surfaktan dimungkinkan mampu meningkatkan dispersi senyawa PAH (Makkar & Rockne, 2003) sehingga lebih mudah dijangkau oleh mikroorganisme.

✚ Pengaruh konsentrasi surfaktan terhadap biodegradasi PAH

Hasil analisis data menunjukkan bahwa penambahan surfaktan dengan konsentrasi 2% dengan 4% tidak dapat meningkatkan biodegradasi PAH secara signifikan. Seperti pada reaktor K0S2 dan K0S4, secara berturut-turut tingkat reduksi PAH adalah 30,81% dan 33,81%. Bahkan pada reaktor K1/2S2 dan K1/2S4 selisih persen reduksi PAH dalam kedua reaktor < 1%. Begitu juga pada reaktor K1S2 dan K1S4, dimana secara berturut-turut persen reduksinya adalah 34,21% dan 34,26%. Data analisis tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi surfaktan 4% tidak memberikan pengaruh besar terhadap kenaikan tingkat degradasi PAH.

Peningkatan kelarutan senyawa PAH sangat dipengaruhi oleh nilai *critical misel concentration* (CMC). Grafik pembentukan misel dapat dilihat pada Gambar 4.24.

Tegangan permukaan



Gambar 4.24 Grafik pembentukan misel

Pada gambar 4.24 dapat diketahui tahapan pembentukan misel. Pada tahap 1, penambahan surfaktan dengan konsentrasi kecil akan menurunkan tegangan permukaan secara perlahan. Pada tahap 2, penambahan surfakatan dengan konsentrasi

tertentu mampu menurunkan tegangan permukaan secara drastis. Hingga pada tahap ke-3, ketika terjadi penambahan surfaktan dengan konsentrasi yang lebih besar maka penurunan tegangan permukaan tetap. Titik dimana pertama kali penurunan tegangan permukaan stagnan disebut dengan CMC.

Jika dikaitkan dengan hasil penelitian, penambahan surfaktan 2% dimungkinkan berada pada tahap ke-2. Selisih tingkat reduksi antara reaktor dengan penambahan surfaktan 2% dengan reaktor tanpa penambahan surfaktan mencapai 9%. Hal ini didukung oleh penelitian Chi (2010), penambahan surfaktan *biodegradable* (Tween 80) dengan konsentrasi 2% merupakan konsentrasi optimum karena mampu meningkatkan kelarutan PAH hingga 30 kali lebih besar. Sebaliknya, penambahan surfaktan 4% justru menunjukkan selisih tingkat reduksi hanya 1%. Penambahan surfaktan dengan konsentrasi 4% diduga telah masuk ketahap ke-3, dimana telah mencapai nilai CMC sehingga pengaruhnya cenderung tetap.

🚩 Uji statistik ANOVA: pengaruh variasi konsentrasi surfaktan terhadap biodegradasi PAH

Hipotesa awal pada analisis ANOVA:

H1: ada pengaruh variasi konsentrasi PAH terhadap tingkat degradasi PAH.

Ho: tidak ada pengaruh variasi konsentrasi surfaktan terhadap tingkat degradasi PAH.

Tingkat kepercayaan ditetapkan sebesar 95%, maka didapatkan nilai F hitung = 118,26 sedangkan nilai F tabel = 4,75. Karena nilai F hitung > F tabel maka Ho ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan surfaktan mempengaruhi tingkat degradasi senyawa PAH selama proses *co-composting*.

Selanjutnya uji signifikansi untuk mengetahui seberapa besar pengaruh konsentrasi surfaktan terhadap tingkat degradasi PAH.

- Pengaruh penambahan surfaktan 2% terhadap tingkat degradasi PAH signifikan dengan nilai $P < 0,05$ ($P = 0,045$).
- Pengaruh penambahan surfaktan 4% terhadap tingkat degradasi PAH signifikan dengan nilai $P < 0,05$ ($P = 0,023$).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis maka dapat ditentukan kesimpulan penelitian sebagai berikut:

1. Metode *co-composting* mampu mereduksi konsentrasi PAH pada tanah terkontaminasi. Tingkat degradasi PAH maksimum terdapat pada reaktor K1/2S2 yaitu sebesar 40,88%, sedangkan tingkat degradasi PAH minimum terdapat pada reaktor kontrol yaitu sebesar 8,35%.
2. Pengaruh variasi umur kompos mampu meningkatkan proses biodegradasi PAH pada proses *co-composting*. Penambahan kompos setengah jadi mampu meningkatkan tingkat degradasi PAH secara signifikan ($P < 0,05$) sedangkan penambahan sampah segar dan kompos jadi tidak signifikan ($P > 0,05$). Reaktor dengan campuran sampah segar, kompos setengah jadi, dan kompos jadi secara berturut turut mampu meningkatkan biodegradasi PAH sebesar 54,82%; 65,94%, dan 58,24% dibandingkan dengan reaktor kontrol.
3. Penambahan surfaktan Tween 80 mampu meningkatkan biodegradasi PAH secara signifikan ($P < 0,05$). Tingkat degradasi PAH rata-rata meningkat sebesar 33,35% pada reaktor dengan penambahan surfaktan 2% dan sebesar 54,62% pada reaktor dengan penambahan surfaktan 4%.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya, adalah:

1. Proses *co-composting* sebaiknya dilaksanakan lebih dari 60 hari, sehingga proses biodegradasi PAH berlangsung lebih optimal.
2. Perlu dilakukan penentuan mekanisme penyisihan PAH yang paling berperan dalam proses *co-composting*, yaitu mineralisasi, fiksasi, atau volatilisasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS

I. Prosedur Analisis Suhu

- a. Peralatan: Soil Tester T-350
- b. Prosedur kerja analisis:
 1. Masukkan Soil Tester T-350 ke bagian tengah kompos.
 2. Diamkan beberapa saat hingga alat menunjukkan suhu yang stabil.
 3. Catat suhu yang ditunjukkan oleh alat.

II. Prosedur Analisis Derajat Keasaman (pH)

- a. Peralatan: Soil Tester T-350
- b. Prosedur kerja analisis:
 4. Masukkan Soil Tester T-350 ke bagian tengah kompos.
 5. Diamkan beberapa saat hingga alat menunjukkan pH yang stabil.
 6. Catat nilai pH yang ditunjukkan oleh alat.

III. Prosedur Analisis Kadar Air

- a. Peralatan: Aquaterr T-350
- b. Prosedur kerja analisis:
 1. Masukkan Aquaterr T-350 ke bagian tengah kompos.
 2. Diamkan beberapa saat hingga Aquaterr T-350 menunjukkan nilai kadar air yang stabil.
 3. Catat kadar air yang ditunjukkan oleh Aquaterr T-350.

IV. Prosedur Analisis C-organik (*Volatile Solid*)

- a. Peralatan:
 1. Cawan porselen
 2. Neraca analitis
 3. *Furnace* dengan suhu 550°C
 4. Oven dengan suhu 105°C
 5. Desikator
- b. Prosedur kerja analisis:
 1. Cawan dimasukkan ke *furnace* 550°C selama 1 jam, setelah itu dimasukkan kedalam oven 105°C selama 15 menit.
 2. Dinginkan cawan dalam desikator selama 15 menit.

3. Timbang cawan dengan neraca analitik.
4. Ambil sampel yang sudah dikeringkan dalam oven selama 24 jam dan masukkan ke cawan yang telah ditimbang. Kuantitas sampel sebatas kapasitas cawan.
5. Timbang cawan yang berisi sampel kering dengan timbangan analitik.
6. Masukkan ke dalam *furnace* 550°C selama 1 jam.
7. Masukkan ke dalam oven 105°C selama 15 menit.
8. Dinginkan dalam desikator selama 15 menit.
9. Timbang cawan dengan neraca analitik.
10. Hitung kadar karbon sampel dengan rumus:

$$\text{Volatile Solid (\%VS)} = \frac{\{c - (a - b)\}}{c} \times 100\%$$

$$\text{Kadar karbon (\%)} = \frac{(\%VS)}{1,8}$$

a = berat cawan + abu setelah pembakaran 550°C (gram)

b = berat cawan kosong setelah pembakaran 550°C (gram)

c = berat cawan + sampel kering (gram)

V. Prosedur Analisis N-Total

a. Peralatan dan Bahan:

1. Neraca analitik
2. Labu kjeldahl
3. Pipet 10 mL
4. *Beaker glass*
5. Gelas ukur
6. Labu volumetrik
7. Erlenmeyer 125 mL
8. Buret

b. Bahan:

1. Tablet kjeldahl
2. H₂SO₄ pekat
3. Aquades
4. NaOH 40%
5. Asam borak petunjuk
6. H₂SO₄ 0,1 N

c. Prosedur kerja analisis:

1. Timbang 0,1 gram sampel dengan neraca analitik.
2. Masukkan kedalam labu ukur.
3. Tambahkan tablet kjeldahl 1 gram dan 10 mL H₂SO₄ pekat, digoyang supaya tercampur.
4. Lakukan destruksi. Destruksi telah sempurna bila cairan terlihat jernih.
5. Dinginkan hasil destruksi. Kemudian encerkan dengan aquades menjadi 100 mL, setelah itu pipet 10 mL cairan destruksi kedalam labu kjeldahl.
6. Kemudian ditambahkan 50 mL aquades dan 20 mL NaOH 40%, segera pasang pada alat kjeldahl.
7. Disiapkan 20 mL asam borat dalam 125 mL Erlenmeyer untuk menampung hasil destilasi. Destilasi dilakukan selama 10 menit setelah tetesan pertama jatuh (hasil destilasi menjadi 50 mL) hasil berwarna hijau.
8. Hasil destilasi dititrasi dengan H₂SO₄ 0,01 N sampai terjadi perubahan warna dari hijau menjadi merah anggur atau ungu.
9. Lakukan prosedur 1-8 untuk blanko.
10. Hitung kadar N-total (%) dengan rumus:

Kadar N – total (%)

$$= \frac{(mL \text{ hasil titrasi sampel} - mL \text{ hasil titrasi blanko})}{\frac{\text{gram sampel}}{\text{kadar air} + 100}} \times 14 \times 0,01 \frac{\text{gram}}{\text{mL}} \times fk$$

$$fk = \frac{\text{kadar air} + 100}{100}$$

VI. Analisis PAH

Peralatan dan bahan

1. Kertas saring
2. Kolomelusi
3. Kolom sokhlet
4. Mantel pemanas
5. *Water bath*
6. Tabung reaksi
7. Neraca analitis
8. GC-MS
9. Pipet 10 MI
10. Labu gelas (250 ml)

11. Diklorometan (Merck p.a)
12. Heksan (Merck p.a)
13. Alumina (Sigma-Aldrich Type WB-5)
14. Silika gel 60 (merk 70-230 mesh ASTM)

a). Ekstraksi PAHs

1. Timbang 5 g sampel (wet, fresh, untreated)



2. Sequential extraction dengan 30 ml dichloromethane dan 30 ml n-pentane.
 - a. Tambahkan 30 ml dichloromethane



- b. Ekstraksi dengan ultrasonic cleaner SIBATA SU-3THE selama 10 menit/ Vibrofix VF 1 Electronic (Ultraturax) 3-5 menit.



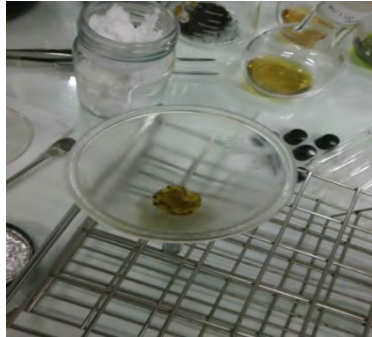
- c. Saring hasil ekstraksi, masukkan ke dalam labu.



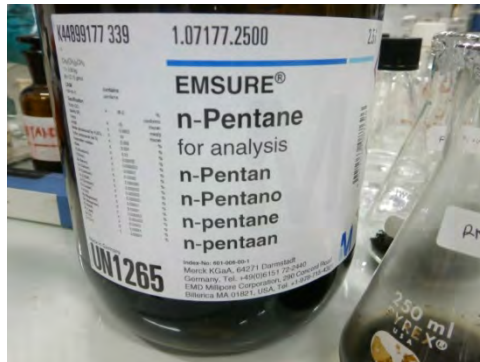
- d. Uapkan dengan Rotavapor BUCHI RE III dan water bath BUCHI 461 hingga volumenya 1 ml.



- e. Setelah diuapkan, ekstrak disaring menggunakan corong yang diisi Na_2SO_4 untuk mengikat air yang terkandung dalam ekstrak.



- f. Sampel yang telah diekstrak dengan dichloromethane, kemudian ditambahkan n-pentane sebanyak 30 ml. Kemudian lakukan langkah b sampai e.



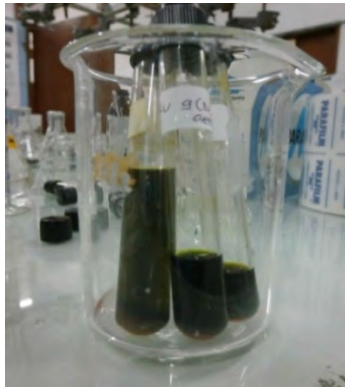
- g. Ekstrak PAH + n-pentane yang telah disaring dengan Na_2SO_4 dimasukkan kedalam tube yang sama dengan ekstrak PAH + DCM.



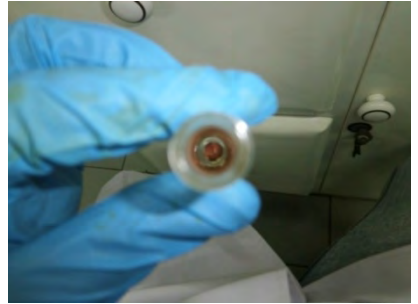
3. Crude extract.

Tambahkan 1 spatula cooper sulfat kedalam ekstrak PAHs (mix) untuk mengikat sulfur. Kemudian dilakukan agitasi

menggunakan Torax selama 5 menit untuk mempercepat pemisahan sulfur dalam ekstrak PAHs. Endapan sulfur dapat dilihat pada bagian bawah tube, berwarna hitam (endapan warna merah adalah cooper sulfat).



4. Dekantasi ekstrak dengan endapan sulfur. Ekstrak dipindahkan ke test tube. Endapan sulfur berwarna hitam. Penambahan cooper sulfat ini mungkin ditambahkan berulang-ulang hingga mendapatkan ekstrak tanpa endapan sulfur.



5. Fraksinasi

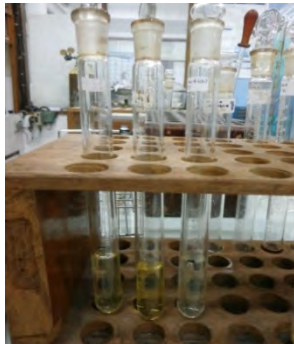
- Kolom fraksinasi dibilas dengan DCM.
- Masukkan kapas steril ke dasar kolom fraksinasi.
- Tambahkan bubuk silika MERCK 7754 sebanyak kurang lebih 2 g (7 ml).



- Tambahkan DCM 5-6 ml ke dalam kolom fraksinasi, kemudian dikocok untuk memadatkan bubuk silika sehingga tidak ada rongga udara (membentuk matrik silika yang kompak). Semakin kompak matriknya maka fraksinasi yang dilakukan semakin bagus.



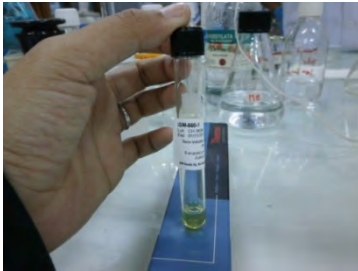
- Butir-butir silika yang tertinggal di dinding kolom setelah proses pengocokan, dibilas dengan DCM kurang lebih 4 ml.
- Tambahkan 1 ml ekstrak PAHs kedalam kolom fraksinasi yang telah siap. Fraksinasi F2 menggunakan pentane: DCM (40:60) hingga hasilnya sebanyak 7 ml.



- Hasil fraksinasi kemudian diuapkan hingga 1 ml.



6. Membuat larutan internal standar PAHs (mengencerkan internal standar 2000 ppm menjadi 6 ppm).

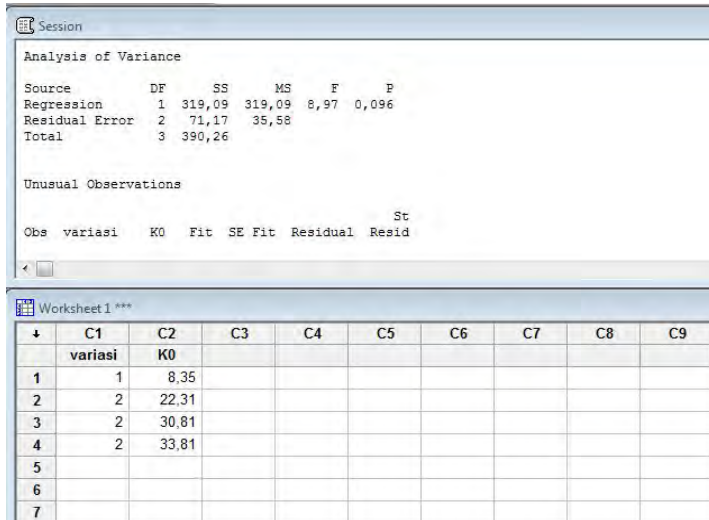


7. Pindahkan hasil fraksinasi yang telah diuapkan kedalam vial dan tambahkan larutan internal standar sebanyak 1 mikromili.
8. Injeksi ekstrak ke GC-MS

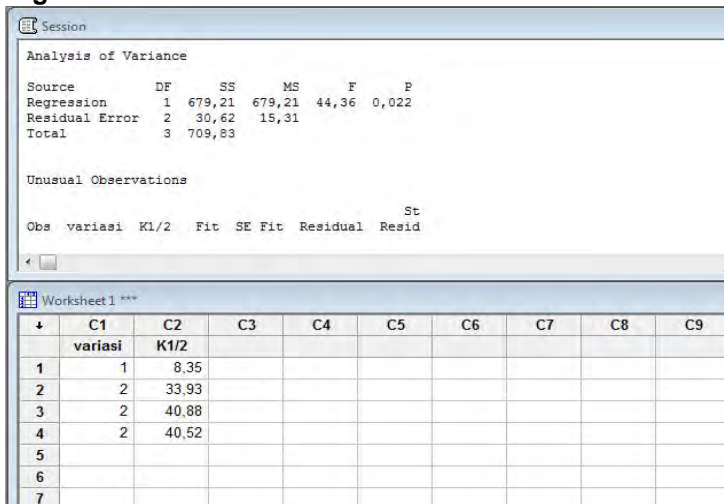


VII. Analisis ANOVA (Minitab)

- Pengaruh sampah segar terhadap tingkat degradasi PAH



- Pengaruh kompos setengah jadi terhadap tingkat degradasi PAH



- Pengaruh kompos jadi terhadap tingkat degradasi PAH

Session

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	679,21	679,21	44,36	0,022
Residual Error	2	30,62	15,31		
Total	3	709,83			

Unusual Observations

Obs	variasi	K1/2	Fit	SE Fit	Residual	St
1	1	8,35				
2	2	33,93				
3	2	40,88				
4	2	40,52				
5						
6						
7						

Worksheet1 ***

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	variasi	K1/2							
1	1	8,35							
2	2	33,93							
3	2	40,88							
4	2	40,52							
5									
6									
7									

- Pengaruh penambahan surfaktan 2% terhadap tingkat degradasi PAH

Session

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	544,73	544,73	20,76	0,045
Residual Error	2	52,48	26,24		
Total	3	597,21			

Unusual Observations

Obs	variasi	S2	Fit	SE Fit	Residual	St
1	1	8,35				
2	2	30,81				
3	2	40,88				
4	2	34,21				
5						
6						

Worksheet1 ***

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	variasi	S2							
1	1	8,35							
2	2	30,81							
3	2	40,88							
4	2	34,21							
5									
6									

- Pengaruh penambahan surfaktan 4% terhadap tingkat degradasi PAH

Session

S = 3,75087 R-Sq = 95,4% R-Sq(adj) = 93,1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	581,58	581,58	41,34	0,023
Residual Error	2	28,14	14,07		
Total	3	609,72			

Unusual Observations

Worksheet1 ***

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	variasi	S4							
1	1	8,35							
2	2	33,81							
3	2	40,52							
4	2	34,26							
5									
6									

LAMPIRAN B
DATA HASIL ANALISIS

Tabel 1 Persen Reduksi Volume Masing masing Reaktor

NO	Reaktor	Volume Awal (cm³)	Volume Akhir (cm³)	Persen Reduksi Volume (%)
1	T100%.1	1176	1078	8,33
2	T100%.2	1176	1097,60	6,67
3	TS2.1	784	744,80	5,00
4	TS2.2	882	823,20	6,67
5	TS4.1	1237,85	1188,33	4,00
6	TS4.2	1155,32	1072,80	7,14
7	KOSO.1	2475,69	1898,03	23,33
8	KOSO.2	2475,69	1567,94	36,67
9	KOS2.1	2640,74	2228,12	15,63
10	KOS2.2	2558,22	1980,56	22,58
11	KOS4.1	2805,79	2228,12	20,59
12	KOS4.2	2805,79	2228,12	20,59
13	K1/2S0.1	1980,56	1567,94	20,83
14	K1/2S0.2	1980,56	1650,46	16,67
15	K1/2S2.1	1980,56	1732,99	12,50
16	K1/2S2.2	1980,56	1732,99	12,50
17	K1/2S4.1	2063,08	1567,94	24,00
18	K1/2S4.2	1980,56	1402,89	29,17
19	K1S0.1	2310,65	1898,03	17,86
20	K1S0.2	2310,65	1898,03	17,86
21	K1S2.1	2558,22	2063,08	19,35
22	K1S2.2	2145,60	1898,03	11,54
23	K1S4.1	2393,17	1980,56	17,24
24	K1S4.2	2475,69	2145,60	13,33

Tabel 2 Persen Reduksi Volume Masing masing Reaktor

No	Reaktor	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Persen Reduksi Massa (%)
1	T100%.1	1000	860	14
2	T100%.2	1000	830	17
3	TS2.1	1000	880	12
4	TS2.2	1000	900	10
5	TS4.1	1000	960	4
6	TS4.2	1000	850	15
7	KOSO.1	1000	850	15
8	KOSO.2	1000	800	20
9	KOS2.1	1000	900	10
10	KOS2.2	1000	920	8
11	KOS4.1	1000	970	3
12	KOS4.2	1000	910	9
13	K1/2S0.1	1000	790	21
14	K1/2S0.2	1000	840	16
15	K1/2S2.1	1000	800	20
16	K1/2S2.2	1000	780	22
17	K1/2S4.1	1000	850	15
18	K1/2S4.2	1000	790	21
19	K1S0.1	1000	830	17
20	K1S0.2	1000	920	8
21	K1S2.1	1000	850	15
22	K1S2.2	1000	900	10
23	K1S4.1	1000	940	6
24	K1S4.2	1000	950	5

Tabel 3 Hasil pengukuran kadar air dalam reaktor

No	Reaktor	Hari ke-												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	T100%.1	50%	40%	40%	40%	50%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
2	T100%.2	50%	40%	40%	40%	50%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
3	TS2.1	50%	40%	40%	40%	50%	45%	45%	40%	50%	50%	50%	50%	40%
4	TS2.2	50%	40%	40%	40%	50%	45%	45%	40%	50%	50%	50%	50%	40%
5	TS4.1	50%	40%	40%	40%	50%	45%	45%	50%	40%	40%	40%	40%	40%
6	TS4.2	50%	40%	40%	40%	50%	40%	45%	50%	40%	40%	40%	40%	40%
7	KOSO.1	50%	65%	60%	65%	70%	70%	70%	70%	80%	65%	70%	65%	65%
8	KOSO.2	60%	65%	60%	60%	60%	70%	70%	60%	45%	60%	55%	45%	50%
9	KOS2.1	55%	60%	60%	60%	60%	70%	70%	70%	70%	80%	70%	65%	50%
10	KOS2.2	55%	55%	55%	60%	70%	70%	70%	70%	60%	60%	75%	60%	60%
11	KOS4.1	60%	60%	60%	70%	70%	70%	70%	60%	50%	60%	55%	60%	65%
12	KOS4.2	65%	65%	60%	70%	70%	70%	70%	65%	65%	65%	70%	65%	50%
13	K1/2S0.1	60%	55%	60%	60%	60%	45%	50%	50%	40%	60%	60%	55%	55%
14	K1/2S0.2	60%	65%	60%	55%	60%	50%	45%	60%	45%	70%	55%	50%	55%
15	K1/2S2.1	60%	60%	60%	70%	60%	70%	65%	55%	50%	55%	65%	55%	45%
16	K1/2S2.2	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	40%	60%	60%	60%	55%
17	K1/2S4.1	60%	65%	60%	70%	60%	55%	60%	60%	55%	60%	70%	55%	50%
18	K1/2S4.2	60%	65%	60%	65%	60%	50%	50%	45%	40%	50%	50%	50%	45%
19	K1S0.1	60%	55%	55%	55%	60%	60%	50%	50%	50%	55%	55%	50%	50%
20	K1S0.2	60%	55%	55%	60%	60%	60%	60%	55%	50%	50%	55%	50%	40%
21	K1S2.1	55%	60%	60%	65%	65%	55%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
22	K1S2.2	55%	60%	60%	65%	60%	55%	50%	55%	55%	55%	60%	50%	50%
23	K1S4.1	55%	65%	60%	70%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	50%	55%
24	K1S4.2	60%	65%	60%	60%	60%	70%	70%	70%	60%	60%	60%	60%	50%

Tabel 4 Hasil pengukuran pH bahan kompos

No	Sampel	Hari ke-												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	T100%.1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2	T100%.2	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
3	TS2.1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
4	TS2.2	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
5	TS4.1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
6	TS4.2	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
7	KOSO.1	5,5	6,5	6	6,5	6,5	7	7	7	7,5	7,5	7,5	7	7,5
8	KOSO.2	5	6,5	6,5	6,5	6,5	7,5	7,5	7	7	7,5	7	7	7,5
9	KOS2.1	5	6,5	6	6	6	7,5	7,5	7,5	7	7	7,5	7,5	7,5
10	KOS2.2	5	6,5	7	6,5	6,4	7	7	7	7,5	7	7	7	7,5
11	KOS4.1	5	6,5	6	6	6	6	7,5	7	7,5	7	7	7	7
12	KOS4.2	5	7	7	6,5	6,5	7	7,5	8	7,5	7,5	7,5	7	7,5
13	K1/2S0.1	7	7	7	7	7	7,5	8	7,5	7	7,5	7	7	7
14	K1/2S0.2	6	6,5	7	8	8	7	7	7	7	7	7,5	7	7,5
15	K1/2S2.1	6	6,5	6,5	7,5	7,5	7,5	8	8	7	7,5	7,5	7	7,5
16	K1/2S2.2	6	6,5	7	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7,5	7,5	7,5	7	7
17	K1/2S4.1	6,5	6,5	6,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7
18	K1/2S4.2	7	6,5	6,5	7,5	7,5	7	7,5	7,5	7	7,5	7,5	7	7,5
19	K1S0.1	7	7,5	7	7,5	7,5	7	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7,5
20	K1S0.2	7	7	7	7,5	7,5	7	7	8	7,5	7	7	7,5	7,5
21	K1S2.1	7	7	7	7,5	7,5	7	7	7	7	7	7	7	7
22	K1S2.2	7	7	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7,5	7,5	7,5	7,5	7	7,5
23	K1S4.1	6,5	6,5	6,5	7	7	7	7	7	7	7,5	7,5	7	7,5
24	K1S4.2	6,5	6,5	6,5	7	7	7	7	7	7	7,5	7	7,5	7

Tabel 5 Hasil pengukuran suhu dalam reaktor

No	Reaktor	Hari ke-																																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
1	T100%.1	32	32	32	31	31	31	31	31	32	31	32	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	33	33	33	32	33				
2	T100%.2	32	32	32	31	31	31	31	31	32	31	32	31	32	32	32	32	32	32	32	31	32	32	32	32	32	32	33	33	33	32	33				
3	TS2.1	32	32	32	31	31	32	31	31	32	31	32	32	33	32	33	33	32	32	32	32	32	32	32	32	33	32	33	33	33	33	33				
4	TS2.2	32	32	32	31	31	32	32	32	32	32	32	33	32	33	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	33	33	33	33	33	33				
5	TS4.1	31	32	32	31	31	32	32	31	32	31	32	31	32	32	32	32	32	32	31	32	31	32	32	32	32	32	32	33	32	33	32	33			
6	TS4.2	32	32	32	31	31	32	31	32	32	31	32	31	32	32	32	32	32	32	31	32	31	32	32	32	32	33	32	32	33	32	33	32	33		
7	KOSO.1	33	34	34	33	33	34	34	34	34	35	33	34	33	34	35	34	34	33	34	33	32	32	32	33	33	32	32	32	33	33	32	33			
8	KOSO.2	34	34	34	33	33	34	34	34	34	35	33	34	33	35	33	34	34	33	34	33	32	31	31	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
9	KOS2.1	34	36	34	33	33	33	34	34	34	35	33	34	33	35	34	34	34	33	34	32	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
10	KOS2.2	34	36	34	34	34	34	34	34	35	34	33	34	36	34	35	34	33	34	32	31	31	32	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
11	KOS4.1	35	36	34	34	34	34	34	34	35	34	33	34	36	36	35	35	34	34	34	32	32	32	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
12	KOS4.2	35	37	35	33	34	34	34	34	34	34	34	35	36	35	36	36	34	34	34	33	33	33	34	33	33	33	33	34	34	34	33	34	34		
13	K1/2S0.1	33	34	33	32	32	32	33	33	34	34	33	32	34	33	33	33	32	33	32	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32		
14	K1/2S0.2	33	33	33	32	32	33	33	33	33	33	32	33	32	33	33	33	33	32	33	32	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
15	K1/2S2.1	34	34	34	32	32	33	33	33	33	33	32	32	32	33	33	33	33	32	33	32	31	31	31	32	32	31	31	31	32	32	32	32	32		
16	K1/2S2.2	34	34	34	32	32	33	33	33	33	33	32	33	32	33	33	33	33	32	33	32	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
17	K1/2S4.1	33	35	34	33	32	33	33	33	33	34	32	33	32	33	33	33	32	32	32	31	31	31	32	32	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	
18	K1/2S4.2	33	34	34	32	32	32	32	32	33	32	33	32	33	32	33	33	32	32	32	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	33	
19	K1S0.1	33	34	33	32	32	32	32	32	33	32	33	32	33	32	33	33	32	33	32	32	32	32	33	33	32	32	33	33	33	33	33	33	33	33	
20	K1S0.2	34	33	32	31	32	32	32	32	33	32	32	32	33	32	33	33	32	33	32	31	31	31	32	32	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	
21	K1S2.1	34	33	33	32	32	32	32	32	32	32	33	32	33	33	33	34	32	33	32	32	32	32	33	33	32	32	32	32	33	33	33	33	33	33	
22	K1S2.2	34	33	33	31	32	32	32	32	33	32	33	32	34	33	33	33	33	34	32	32	32	32	33	33	32	32	32	32	33	33	33	33	33	33	
23	K1S4.1	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	33	32	34	32	33	33	32	33	32	31	32	31	32	32	32	32	32	33	33	33	32	33	33	33	
24	K1S4.2	33	33	33	31	32	32	32	32	32	32	33	32	34	33	33	33	32	33	32	31	32	31	33	32	31	32	32	32	32	32	32	32	32	33	33
25	Suhu Ruang	33	33	34	33	32	32	32	33	34	34	33	33	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	35	35	35	34	36	35	36	35	35	35	35	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Tabel 6 Hasil pengukuran suhu dalam reaktor

No	Reaktor	Hari ke-																													
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	T100%.1	32	32	32	32	33	33	32	33	33	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33	34
2	T100%.2	32	32	32	32	33	33	32	33	33	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33	34
3	TS2.1	32	32	33	32	33	32	33	33	33	33	32	32	33	34	32	33	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33	34	
4	TS2.2	32	33	33	32	33	33	32	33	33	33	32	32	32	34	32	33	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33	34	
5	TS4.1	32	32	33	32	33	33	32	33	33	32	33	32	33	32	34	32	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33	34	
6	TS4.2	32	32	33	32	33	33	32	33	33	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33	34	
7	KOSO.1	33	32	33	32	33	33	32	33	33	32	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	33	32	34	34	35	34	34	33	33	
8	KOSO.2	32	32	33	32	33	33	32	33	33	32	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	32	32	32	34	34	34	34	34	33	33
9	KOS2.1	32	32	34	32	33	33	33	33	33	32	33	32	33	32	33	31	33	32	33	33	32	32	32	33	33	34	34	34	32	32
10	KOS2.2	32	32	34	32	32	32	32	33	33	32	33	32	33	32	34	32	33	33	33	33	32	32	32	33	34	34	34	34	32	33
11	KOS4.1	32	32	33	32	32	32	32	33	33	32	33	32	34	32	34	32	34	33	34	34	33	33	32	34	34	35	35	34	33	33
12	KOS4.2	33	33	34	33	34	33	33	34	34	33	33	32	33	32	34	32	34	33	34	34	34	34	34	32	34	34	34	34	33	34
13	K1/2S0.1	32	32	33	32	33	32	32	33	33	32	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	32	32	32	34	34	34	34	34	33	33
14	K1/2S0.2	33	32	33	32	33	33	32	33	33	32	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	32	32	32	34	34	34	34	34	33	33
15	K1/2S2.1	32	32	33	32	32	32	32	33	33	32	32	32	33	32	33	31	33	33	33	33	32	32	32	34	34	34	34	34	33	33
16	K1/2S2.2	32	32	33	32	33	32	32	33	33	32	33	32	33	32	33	32	33	33	33	33	33	32	32	34	34	34	34	34	33	33
17	K1/2S4.1	32	32	33	32	32	32	32	33	33	32	32	32	33	32	33	31	33	33	33	33	32	32	32	34	34	34	34	34	33	33
18	K1/2S4.2	32	32	33	32	33	32	32	33	33	32	32	32	33	32	33	31	33	33	33	33	33	32	34	34	34	34	34	34	33	33
19	K1S0.1	32	33	34	32	33	33	32	33	34	33	33	32	33	32	34	32	33	34	33	34	34	34	33	34	34	35	35	34	33	34
20	K1S0.2	32	32	33	32	32	32	32	33	32	32	32	32	33	31	32	33	33	33	33	32	32	33	34	34	34	34	34	34	32	33
21	K1S2.1	32	33	34	32	33	33	32	33	33	33	33	32	33	32	34	32	33	33	33	33	34	34	32	34	34	34	34	34	33	34
22	K1S2.2	32	33	34	32	33	33	32	33	33	33	33	32	33	32	34	32	33	33	33	33	34	34	32	34	34	34	34	34	33	34
23	K1S4.1	32	32	33	32	33	33	32	33	33	33	33	32	33	32	34	32	33	33	33	33	33	32	34	34	34	34	34	34	33	34
24	K1S4.2	32	32	33	32	33	32	32	33	33	33	33	32	33	32	34	32	33	33	33	33	33	32	34	34	34	34	34	34	33	33
25	Suhu Ruang	35	35	35	34	35	35	34	35	35	35	35	34	34	34	36	35	36	36	36	36	36	36	35	37	36	36	36	37	36	36

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C
DOKUMENTASI PENELITIAN



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)



(m)



(n)



(o)

Keterangan gambar:

- (a) Sampah segar setelah dicacah
- (b) Kompos setengah jadi
- (c) Kompos jadi
- (d) Pencacahan bahan kompos
- (e) Reaktor co-composting
- (f) Reaktor co-composting
- (g) Pengukuran suhu dalam reaktor
- (h) Pengukuran kadar air bahan kompos
- (i) Jamur mulai tumbuh dipermukaan bahan kompos

- (j) Rewatering kompos**
- (k) Pengkondisian kompos**
- (l) Pengkondisian bahan kompos (pengadukan bahan kompos)**
- (m) Sampel dalam botol gelap**
- (n) Freezer sampel**
- (o) Icebox sampel**

DAFTAR PUSTAKA

- Abouelwafe, R., Addi, G. A., Souabi, S., Wterton, P., Cegarra, J., dan Hafidi, M. 2008. "Aerobic Biodegradation of Sludge from The Effluent of a Vegetable Oil Processing Plant Mixed with Household Waste". **Physical, Chemical, Microbiological, and Spectroscopic Analysis. Bioresource Technology**, 99:8571-8577.
- Achten, C., dan Hofmann, T. 2009. "Native Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) in coal A-hardly recognized source of environmental contamination". **Science of The Total Environment** 8, 407:2461-2473.
- Ahmad, F. 2012. "Kandungan Senyawa Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) di Teluk Jakarta". **Ilmu Kelautan UNDIP** 17, 4:199-208.
- Ahrens, M. J., dan Morrissey, D. J. 2005. "Biological Effects Of Unburn Coal In The Marine Environment. in: Oceanography dan Marine Biology". **CRC Press**, 69-122.
- Antizar-Ladislao, B., Lopez-Real, J. M., dan Beck, A. J. 2004. "Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) - Contaminated Waste Using Composting Approaches". **Critical Reviews in Environmental Science dan Technology** , 34:249-289.
- Arbabi, M., Nasser, S., dan Chimezie, A. 2009. "Biodegradation Of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) In Petroleum Contaminated Soils". **J. Chem. Chem. Eng** 28, 3: 53-59.
- Atagana, H. I. 2012. "**Co-Composting of PAH-Contaminated Soil With Poultry Manure**". Durban, South Africa : School of Earth Science.
- ATSDR.U.S. 2012. **Case Studies in Environmental Medicine Toxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)**. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) U.S. 15-17.
- Banat, I. M., Makkar, R. S., dan Cameotra, S. S. 2000. "Potential commercial applications of microbial surfactants". **Appl. Microbiol Biotechnol**, 53:495-508.
- Bamforth, S. M., dan Singleton, I. 2005. "Review Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons : Current knowledge

- and future directions". **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 80:723-736.
- Barlianti, V. 2009. **Fungsionalisasi Komposit PAH**. Depok: Fakultas Teknik UI.
- Bautista, L. F., Sanz, R., Molina, M. C., González, N., Sánchez, D. 2009. "Effect of different nonionic surfactants on the biodegradation of PAH by diverse aerobic bacteria". **Int Biodeter Biodegr**, 63(7):913e22.
- Beck, A. J., Johnson, D. L., dan Jones, K. C. 1996. "The form and bioavailabilitas of non-ionic organic chemicals in sewage sludge-amended agricultural soils". **Sci. Total Environ**, 185:1-3, 125-149.
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., dan Moral, R. 2009. "Composting of Animal Manures and Chemical Criteria for Compost Maturity Assessment". **A Review : Biosource Technology**, 100:5444-5453.
- Bertoldi, M.D., Sequi, P., Lemmes, B., dan Papi, T. 1996. "The Science of Composting, Part 1". **Springer-Science+Business Media, B.V.**
- Bryer, P. J., Elliot, J. N., dan Willingham, E. J. 2006. "The Effects of Coal Tar Based Pavement Sealer on Amphibian Development and Methamorphosis. USA". **Ecotoxicology**, 15:241-247.
- Cerniglia, C. 1992. "Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons". **Biodegradation** 3, 2-3:351-361.
- Chi, F. 2010. "Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Contaminated Soils by Nonionic Surfactants: Column Experiments". **Environmental Engineering Science** 28, 2:1-7.
- Dyke, P. H., Foan, C., dan Fiedler, H. 2003. "PCB and PAH releases from power stations and waste incineration processes in the UK". **Chemosphere**, 50:469-480.
- Efendi, M. 2012. "Pengolahan Sampah Permukiman Di Kawasan Pedesaan Kabupaten Ponorogo (Studi Kasus Kecamatan Bungkal)". **Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS**.
- ESDM. 2013. **Indonesian Mineral dan Coal Mining Statistics 2012**. Dirjen Minerba, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.

- Fernandez, P., Grimalt, J. O., dan Vilanova, R. M. 2002. "Atmospheric gas-particle partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in high mountain regions of Europe". **Environl. Sci. Technol** **36**, 6:1162–1168.
- Gan, S., Lau, E. V., dan Ng, H. K. 2009. "Remediation of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)". **Journal of Hazardous Materials** **172**:532-549.
- Gonzalez, N., Simarro, R., Molina, M. C., Bautista, L. F., Delgado, L., dan Villa, J. A. 2011. "Effect of surfactants on PAH biodegradation by a bacterial consortium and on the dynamics of the bacterial community during the process". **Bioresource Technology**, 102:9438-9446.
- Halifah, S. A. 2012. **Pencemaran Tanah dan Dampaknya Terhadap Lingkungan**. Pontianak : Jurusan Pendidikan MIPA, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Tanjungpura.
- Hapsari, P. P. J. 2014. **Pengolahan Lumpur Berminyak Dengan Metode Co-composting**. Surabaya : Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS.
- Haritash, A. K., dan Kaushik, C. P., 2009. "Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)". **A review. Journal of Hazardous Materials**, 169:1–3;1-15.
- Herawan, T. 1998. "Biosurfaktan : Aplikasi dan Peluang Minyak Sawit sebagai Bahan Baku" **Warta Pusat Penelitian Kelapa Sawit** **6**, 2: 83 - 92.
- Hu, M., Zhao, S., Li, C., Wang, B., Yao, C., dan Wang, Y. 2014. "The influence of different Tween surfactants on biosulfurization of ground tire rubber by *Sphingomonas sp.*". **Polymer Degradation dan Stability**, 107: 91-97.
- Jatmika, A. 1998. "Aplikasi Enzim Lipase dalam Pengolahan Minyak Sawit dan Minyak Inti Sawit Untuk Produk Pangan". **Warta Pusat Penelitian Kelapa Sawit** **6**, 1:31-37.
- Kamiya, N., Inoue, N., Goto, M., Nakamura, N., dan Naruta, Y. 2000. "Catalytic and Structural Properties of Surfactant-horseradish Peroxide Complex in Organic Media" in Sing *et al.* "Surfactants in Microbiology dan Biotechnology: Part 2. Application Aspects". **Department of Biology**,

University of Waterloo ; Department of Biological Sciences; Thompson Rivers University.

- Kanaly, R. A., dan Harayama, S. 2000. "Biodegradation of High Molecular Weight Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) by Bacteria. **Journal of Bacteriology** **182**, 8:2059-2067.
- Kasmidjo, R. B. 1990. **Penanganan Limbah Pertanian, Perkebunan, dan Industri Pangan**. Jogjakarta: UGM Press.
- Kearns, D. B., dan Losick, R. 2003. "Swarming motility in undomesticated *Bacillus subtilis* in Sing *et al.* Surfactant Microbiology dan Biotechnology : Part 2. Application Aspects. **Department of Biology, University of Waterloo ; Department of Biological Sciences; Thompson Rivers University.**
- Llado, S., Covino, S., Solanas, A. M., Vinas, M., Petruccioli, M., D'annibale, A. 2013. "Comparative assesment of biodegradation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil". **Journal of Hazardous Materials**, 248-249:407-414.
- Lors, C., Damidot, D., Ponge, J. F., dan Perie, F. 2012. "Comparison of a bioremediation process of PAH in a PAH-contaminated soil at field dan laboratory scales". **Universite Lille Nord de France**, 165:11-17.
- McKinney, C. 2006. **Polycyclic Aromatic Hydrocarbons & Coal Tar Sealants**. New York : Department of Planning dan Development : Division of Water Resources.
- Mirwan, M. 2012. "Pemanfaatan Sampah Kebun sebagai Bahan Baku Kompos dan Pupuk Organik Granula dengan Penambahan Kotoran Sapi sebagai Bioaktivator". **Jurusan teknik Lingkungan, FTSP-ITS.**
- Mizwar, A., dan Trihadiningrum, Y. 2014. "Potensi Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Polycyclic Aromatic Hydrocarbons dari Batu bara dengan Komposting". **Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS.**
- Munawir, K. 2007. "Kadar Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) dalam Air, Sedimen, dan Sampel Biota di Perairan Teluk Klabat Bangka". **Oseanol. Limnol. Indonesia**, 33:441-453.

- Mukaromah, E., Prijambada, I. D., Widada, J., dan Ma'as, A. 2012. **Studi Makrokosmos Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi Melalui Inokulasi Mikroorganisme dan Pemberian Nutrisi Berulang**. Jogjakarta: Laboratorium Mikrobiologi Tanah dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.
- Mulligan C. N. 2005. "Environmental applications of biosurfactants". **Environ Pollut**, 133:183–98.
- Nurdiyanto. 2008. **Makalah Surfaktan, Industrialisasi Menuju Kehidupan yang Lebih Baik**. Bogor : Akademi Kimia Analisa Bogor
- Permatasari, D. A. 2013. **Pengolahan Limbah Padat Rumah Potong Hewan dengan Proses Pengomposan Sistem A2O**. Surabaya: Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS.
- Pies, C., Yang, Y., dan Hofmann, T. 2007. "Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Floodplain Soils of The Mosel and Saar River". **J Soils Sediments** 7, 4:216–222.
- Prince, R. C. 1997. "Bioremediation of marine oil spills". **Experiences, lessons, and results from the Exxon Valdez oil spill in Alaska**, 3:315–35.
- Pulungan, D. 2013. <URL:<http://wordpress.com/pengelolaan-lahan-tercemar-minyak-bumi>>. Diakses pada tanggal 11 Agustus 2014 pukul 16.35 WIB.
- Raden, I., Pulungan, M. S., Dahlan, M., dan Thamrin. 2010. **Kajian Dampak Penambangan Batu bara Terhadap Pengembangan Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan di Kabupaten Kutai Kartanegara**. Jakarta : Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Dalam Negeri.
- Richardson, J. 1996. **Handbook of Qualitative Research Methods for Psychology dan the Social Sciences**. Denmark : Psykologisk Institut, Aarhus Universitet.
- Rosenberg, E., dan Ron, E. Z. 2002. "Surface active polymers from the genus *Acinetobacter*". In: **Kaplan DL, editor. Biopolymers from renewable resources**. Berlin: Springer; 281–9.

- Sarbini, K. 2012. **Biodegradasi Pyrena Menggunakan *Bacillus Subtilis* C19**. Depok: Fakultas Teknik, Program Studi Teknologi Bioproses, Departemen Teknik Kimia.
- Sayara, T., Sarra, M., dan Sanchez, A. 2009. "Effect of Composting Controlling Factors on the Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) Contaminated Soil". **Palstine: Proceedings of the Second International Conference on Energy and Environmental Protection in the Sustainable Development**,
- Singh, A., Van Hamme, J. D., dan Ward, O. P. 2006. "Surfactants in Microbiology and Biotechnology : Part 2. Application Aspects". **Department of Biology, University of Waterloo ; Department of Biological Sciences; Thompson Rivers University**.
- Suriawiria, U. 2002. **Pupuk Organik Kompos dari Sampah, Bioteknologi Agroindustri**. Bandung: Humaniora Utama Press.
- Van-Hamme J. D., Singh, A., dan Ward, O. P. 2003. "Recent advances in petroleum microbiology". **Microbiol Mol Biol Rev**, 67:503–49.
- Wang, R., Liu, G., Chou, C. L., Liu, J., dan Zhang, J. 2010. "Environmental Assessment of PAH in Soils Around The Anhui Coal District China". **Archives of environmental contamination dan toxicology** 59, 1:62-70.
- Wilson, S. C., dan Jones, K. C. 1992. "Bioremediation of soil contaminated with Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAH)". **A review. Environ. Pollut** 81, 229–249.
- Wulandari, R.A. 2014. "Proses Komposting Limbah Padat Rumah Potong Hewan dengan Metode Aerobik dan A²O (Anaerobik Anoksik Oksida)". **Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS**.
- Yao, C., Zhao, S., Wang, Y., Wang, B., Wei, M., dan Hu, M. 2013. "Microbial desulfurization of waste latex rubber with *Alicyclobacillus sp*". **Polym Degrad Stab** 98, 9:1724e30.
- Zhang, D., dan Zhu, L. 2012. "Effect of Tween 80 on the removal, sorption, and biodegradation of pyrene by *Klesiellaoxytoca* PYR-1". **Department of Environmental Science, Zhejiang University ; Zhejiang Key**

**Laboratory of Organic Pollution Process dan Control,
164:169-174.**

Zhang, Y., Zhu, Y. G., Houot, S., Qiao, M., Nunan, N., dan Garnier, P. 2011. "Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) contaminated soil through composting with fresh organic wastes". **Environmental science dan pollution research international** 18, 9:1574-1584.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penyusun tugas akhir ini memiliki nama lengkap Bang Putra Sinaga dengan nama panggilan Bang. Penulis dilahirkan di Sirube-rube 8 Oktober 1992 sebagai anak bungsu dari Bapak J. Sinaga dan H. Sirait. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Sirube-rube (1999-2005), SMP N 1 Dolok Pardamean (2005-2008), dan SMA N 1 Raya (2008-2011). Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik

Lingkungan FTSP-ITS dengan NRP. 3311100073 pada tahun 2011 melalui jalur SNMPTN tertulis.

Semasa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi kampus. Penulis sempat tergabung di ITS Education Care Centre sebagai volunteer pengajar. Penulis juga diamanahi sebagai Kepala Departemen Riset dan Teknologi (RISTEK) Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan FTSP-ITS (2013-2014). Selain itu, penulis juga aktif sebagai peserta pelatihan “Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa (LKMM)” meliputi LKMM Pra Tingkat Dasar, LKMM Tingkat Dasar, dan LKMM Tingkat Menengah. Sebelumnya penulis sempat melakukan internship di PT Medco E&P Indonesia di Blok Lematang-Palembang, Sumatera Selatan. Segala bentuk komunikasi yang ingin disampaikan kepada penulis terkait dengan Tugas Akhir ini dapat disampaikan melalui email: putrasinaga.ps@gmail.com. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk penelitian selanjutnya.