

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS DATA

4.1. Karakteristik Tanah Tercemar di PT. X

Analisa Karakteristik Sifat Tanah Pencemar dilakukan untuk mengetahui titik tanah yang paling tinggi tingkat pencemaran hidrokarbonnya sebelum tanah tersebut digunakan pada reaktor penelitian. Analisa dilakukan di 7 titik tanah di tanah terbuka PT. X yang berdekatan dengan sumber pencemar.

4.1.1. Karakteristik Fisika Tanah Tercemar di PT. X

Analisa Karakteristik Sifat Fisika dilakukan terhadap tanah tercemar tumpahan minyak di PT. X, Yogyakarta sebelum digunakan untuk remediasi. Penelitian dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Berikut Karakteristik Fisika yang di uji pada tanah tercemar.

a. Suhu Tanah

Adapun suhu tanah tercemar pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1. Suhu tanah pada 7 titik pengambilan sampel tanah tercemar pada kedalaman 10 cm dan 40 cm di PT. X Yogyakarta

Tanah	Suhu Tanah (°C)	
	10 cm	40 cm
T1	31	33
T2	32	33
T3	30,9	33,5
T4	32	33
T5	30,8	29,5
T6	32	31,4
T7	30,5	32

Menurut Baver (1960), temperatur tanah utamanya sangat tergantung oleh jumlah radiasi yang diterima dari matahari. Kuantitas dari panas yang didapat dari permukaan bumi oleh konduksi dari bumi atau berasal dari unsur kimia dan proses biologi yang kecil memberikan efek terhadap temperatur tanah. Menurut Kartasapoetra (2005), faktor pengaruh suhu tanah yaitu faktor luar dan faktor dalam. Faktor luar yaitu radiasi matahari, awan, curah hujan, angin dan kelembaban udara. Faktor dalamnya yaitu faktor tanah, struktur tanah, kadar air tanah, kandungan bahan organik, dan warna tanah.

Umumnya kecepatan degradasi minyak bumi oleh bakteri aerob berlangsung optimum pada suhu berkisar antara $15^{\circ} - 30^{\circ} \text{C}$ (Zam, 2010). Kemudian Prasetya et al (2016) menyatakan bahwa bakteri yang berpotensi mendegradasi senyawa sulfur aromatik minyak bumi tumbuh dengan baik pada kisaran suhu $\pm 30^{\circ} \text{C}$. Scheider dan Billingsley (1990), menyebutkan bahwa temperatur yang optimum untuk biodegradasi adalah $10^{\circ} \text{C} - 40^{\circ} \text{C}$.

Semua sampel tanah pada penelitian awal berada pada suhu optimum sesuai dengan Scheider dan Billingsley (1990) yaitu $10^{\circ} \text{C} - 40^{\circ} \text{C}$. Sampel tanah T1, T2, T3, T4 dan T7 memiliki suhu tanah lebih tinggi pada kedalaman 40 cm dibandingkan pada kedalaman 10 cm. Hal ini bisa disebabkan tanah pada kedalaman diatas 30 cm masih menyimpan energi radiasi matahari yang diterima sehari sebelumnya. Selain itu bisa dilihat secara fisik dari perbedaan warna tanah yang ada. Tanah dengan kedalaman 40 cm lebih gelap dibandingkan dengan tanah pada kedalaman 10 cm. Menurut Santosa (1986), tanah yang lebih gelap indeks suhunya lebih tinggi. Aktivitas mikroba juga dapat menjadi penyebab terjadinya kenaikan pada suhu tanah.



Gambar 4. 1. Perbedaan warna lapisan tanah tercemar pada kedalaman 40 cm di PT. X, Yogyakarta

b. Kadar Air Tanah

Selain suhu tanah, karakteristik fisik yang sangat mempengaruhi bioremediasi teknik *composting* adalah kadar air tanah. Pada penelitian awal ini, semua sampel tanah memiliki kadar air yang sangat jauh dari kadar air normal. Tanah biasanya memiliki kadar air berkisar antara 15% sampai 100% (Wesley, 1977). Jika nilainya berada di bawah 40% maka, menurut Cookson (1995), proses bioremediasi akan berjalan lambat atau terganggu, namun untuk mengoptimalkan proses degradasi hidrokarbon tidak boleh melebihi 60%. Menurut Indradana (1994), kedalaman lapisan tanah mempengaruhi kadar air. Semakin dalam lapisan tanah maka ketersediaan kadar air juga akan semakin banyak. Berikut tabel mengenai persentase kadar air pada tanah tercemar untuk penelitian awal.

Tabel 4. 2. Kadar air pada 7 titik pengambilan sampel tanah tercemar pada kedalaman 10 cm dan 40 cm di PT. X Yogyakarta

Tanah	Kadar air (%)	
	10 cm	40 cm
T1	3,7	4,4
T2	4,2	4,5
T3	1,7	2,2
T4	2,8	3,6
T5	2,0	1,8
T6	3,2	4,6
T7	1,8	2,6

Hal ini dapat dilihat dalam tabel diatas, bahwa semua sampel kecuali tanah T5, memiliki persentase kadar air yang lebih besar pada kedalaman tanah 40 cm dibandingkan dengan kadar air pada kedalaman tanah 10 cm. Tanah T5 memiliki kadar air yang lebih rendah pada kedalaman tanah 40 cm. Hal ini disebabkan oleh kandungan *TPH* T5 yang paling tinggi dibandingkan dengan sampel tanah lain. Menurut Munawar (2012), tanah yang tercemar hidrokarbon akan menutupi partikel tanah sehingga air terperangkap dalam pori-pori tanah. Kondisi ini juga terjadi karena sifat partikel tanah lebih mudah berikatan dengan air dibandingkan dengan minyak.

4.1.2. Karakteristik Kimia Tanah Tercemar di PT. X Yogyakarta

Karakteristik Sifat Kimia Tanah Tercemar yang di analisa ini yaitu uji *pH*, *Total Petroleum Hydrocarbon*, dan Logam Berat. Seperti karakteristik sifat fisika tanah, pengambilan sampel tanah tercemar di lakukan juga pada kedalaman tanah 10 cm dan 40 cm. Hal ini bertujuan untuk melihat seberapa dalam tumpahan minyak yang ada. Karakteristik Sifat Kimia Tanah Tercemar adalah sebagai berikut.

a. *pH*

Derajat keasaman (*pH*) adalah indikator terjadinya proses biokimia. Kehidupan mikroorganisme dalam proses biodegradasi hidrokarbon sangat dipengaruhi oleh *pH*. Sebagian besar biodegradasi senyawa hidrokarbon berlangsung pada *pH* netral. Ada dua pengertian *pH* tanah yaitu *pH* aktual dan *pH* potensial. *pH* aktual adalah *pH* yang menunjukkan konsentrasi ion H^+ baik yang berada di dalam larutan tanah maupun yang berada di dalam larutan serapan (Wulandani, 2016)

Penentuan *pH* secara aktual ditentukan dengan senyawa H_2O dan *pH* yang terukur merupakan nilai konsentrasi ion H^+ dalam larutan tanah. Ion H^+ yang berasal dari larutan H_2O tidak mampu mendesak ion H^+ yang ada didalam kisi-kisi tanah. Untuk *pH* dengan senyawa KCl akan mengakibatkan terdesaknya ion H^+ yang berada didalam kompleks serapan tanah oleh ion H^+ . Oleh karena itu, ion H^+ yang

ada terdesak keluar sehingga konsentrasi H^+ pada larutan tanah bertambah mengakibatkan nilai pH turun dengan demikian mengakibatkan pH potensial lebih kecil dari pH aktual. Berikut tabel mengenai pH pada tanah tercemar di PT. X.

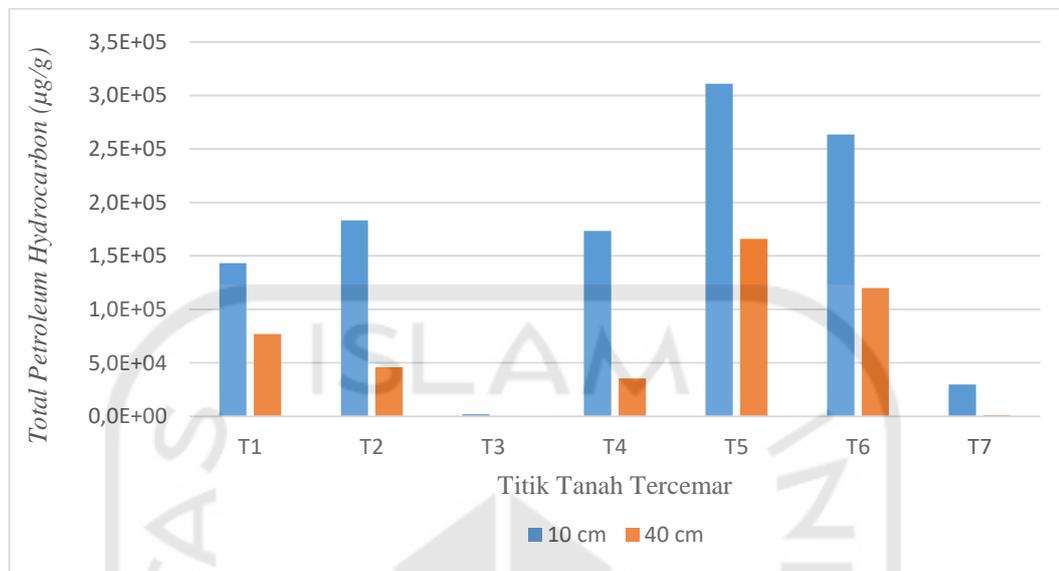
Tabel 4. 3. Nilai pH pada 7 titik tanah tercemar pada kedalaman 10 cm dan 40 cm di PT. X, Yogyakarta

Tanah	pH (H ₂ O)		pH (KCl)	
	10 cm	40 cm	10 cm	40 cm
T1	7,4	5,9	6,4	6,1
T2	7,3	7,1	6,4	6,2
T3	8,3	7,8	6,4	5,1
T4	7,8	7,6	6,9	6,5
T5	6,7	5,6	6,1	5,6
T6	6,9	6,6	6	6
T7	8,2	7,8	6	5,8

Dapat dilihat pada tabel bahwa semua sampel tanah memiliki pH aktual dan pH potensial yang masih berada di kisaran pH netral dan pH alkali. Nilai pH lingkungan yang tercemar berpengaruh terhadap kemampuan mikroorganisme baik untuk menjalankan fungsi selular, traspor membran sel maupun keseimbangan reaksi yang dilakukan oleh mikroorganisme. Menurut Brodkorb (1992), Sebagian besar bakteri tumbuh dengan baik pada pH netral hingga pH alkali. Pertumbuhan mikroba tidak berlangsung dengan baik pada pH di bawah 5. Sedangkan degradasi senyawa hidrokarbon diketahui berlangsung lebih cepat pada pH di atas 7 jika dibandingkan dengan degradasi sama pada $pH = 5$.

b. Total Petroleum Hydrocarbon

Karakteristik sifat kimia tanah yang di analisis selanjutnya yaitu *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)*. *TPH* merupakan parameter utama dalam penelitian bioremediasi ini. Berikut nilai *TPH* dari 7 titik tanah tercemar pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 2. Nilai *TPH* pada 7 titik tanah tercemar pada kedalaman 10 cm dan 40 cm di PT. X, Yogyakarta

T1, T2, T3 dan T4 berdekatan dengan tempat penyimpanan oli bekas, sedangkan T7 berada 10 meter dari tempat pencucian rangka bawah kereta api. Pada kedalaman 10 cm di titik T1, T2, T4 dan T7 memiliki nilai *TPH* yang tinggi dibandingkan pada kedalaman 40 cm. Hal ini dapat dipastikan tumpahan minyak tidak sampai pada kedalaman 40 cm dari tanah yang berarti persebaran dari tumpahan tanah tidak luas. Titik T3 memiliki nilai *TPH* yang rendah pada kedua kedalaman tanah.

Nilai *TPH* tertinggi pada kedalaman 10 cm dan 40 cm terdapat pada sampel tanah T5 dan T6. Titik T5 berada di belakang tempat pencucian bagian mesin diesel dari kereta api. Menurut keterangan karyawan PT. X, bagian mesin diesel biasa menggunakan oli pelumas bermerk dagang Diloika 448 X SAE 40. Proses pencucian mesin diesel menggunakan solar lalu *finishing* dengan menggunakan air biasa. Titik T6 berada di belakang tempat pencucian rangka bawah dari kereta api. Bagian dari rangka bawah biasa menggunakan oli pelumas bermerk Gulf Gear Grease LM. Proses pencucian rangka bawah menggunakan solar yang dicampur dengan soda api kemudian *finishing* dengan air biasa.



Gambar 4. 3. Total Petroleum Hydrocarbon yang didapatkan dari 7 titik tanah tercemar pada kedalaman 10 cm di PT. X, Yogyakarta

Tabel 4.4. menunjukkan persentase konsentrasi *TPH* pada 5 gram tanah tercemar yang diuji.

Tabel 4. 4. Konsentrasi *TPH* (%) pada 7 titik tanah tercemar pada kedalaman 10 cm dan 40 cm di PT. X, Yogyakarta

Tanah	<i>TPH</i> (%)		KepmenLH No. 128 tahun 2003
	10 cm	40 cm	
T1	7	4	2-15 %
T2	9	2,3	
T3	0,098	0,016	
T4	9	2	
T5	16	8	
T6	13	6	
T7	1,49	0,07	

Untuk parameter *TPH* berdasarkan Kep-04/BAPEDAL/09/1995, Tanah pada titik T3 dan T7 yang memiliki konsentrasi *TPH* $\leq 1\%$ bentuk penanganannya berupa penempatan pada lahan khusus dan terbatas dan pemanfaatan dengan ditanami tumbuhan yang non konsumsi atau menjadi bahan pencampur lapisan jalan, material bangunan dan lain-lain. Untuk konsentrasi *TPH* $> 2\%$ maka proses pengolahan biologis dapat dilakukan hingga memenuhi kriteria sehingga titik T1, T2, T4, T5, dan T6 dapat digunakan untuk penelitian bioremediasi ini. Namun T5 dan T6 adalah titik yang paling memenuhi syarat untuk di bioremediasi karena memiliki nilai *TPH* yang paling tinggi pada titik tersebut.

Persyaratan dari limbah minyak bumi yang diolah secara biologis menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003 salah satunya

yaitu konsentrasi maksimum *TPH* awal sebelum proses pengolahan biologis tidak lebih dari 15%. Oleh karena itu, untuk perlakuan bioremediasi ini dilakukan pencampuran tanah T5 dan T6 dengan rasio 1:1. Hal ini diharapkan dapat mengurangi persentase konsentrasi *TPH* dalam tanah tercemar agar dapat di olah secara biologis.

c. Logam Berat

Berdasarkan Keputusan Menteri Negeri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003, sebelum melakukan pengolahan limbah minyak bumi dengan metode biologis maka perlu dilakukan analisis terhadap bahan yang diolah untuk mengetahui komposisi dan karakteristik limbah salah satunya yaitu total logam berat. Persyaratan limbah minyak bumi yang diolah secara biologis yaitu hasil uji logam berat berada di bawah baku mutu seperti yang dicantumkan didalam Kep-04/Bapedal/09/1995. Untuk Timbal baku mutunya yaitu 5 mg/L, dan Kadmium baku mutunya yaitu 1 mg/L. Berikut tabel mengenai konsentrasi logam berat Pb dan Cd di 7 titik pengambilan sampel tanah tercemar.

Tabel 4. 5. Logam Pb dan Cd pada 7 titik pengambilan sampel tanah tercemar di PT. X, Yogyakarta

Tanah	Pb (mg/L)		Baku Mutu Pb (mg/l)	Cd (mg/L)		Baku Mutu Cd (mg/L)
	10 cm	40 cm		10 cm	40 cm	
T1	1,63	1,72	5 mg/L	0,09	0,13	1 mg/L
T2	1,56	1,65		0,11	0,14	
T3	4,43	4,64		0,18	0,22	
T4	1,55	1,76		0,13	0,15	
T5	2,34	2,45		0,19	0,23	
T6	1,93	2,11		0,14	0,17	
T7	3,57	3,67		0,16	0,18	

Dari hasil pengujian logam berat Pb dan Cd, kedua parameter tersebut masih dibawah baku mutu TCLP. Menurut Mühlbacova, *et al.*, (2005), kandungan logam berat tanah dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah jenis tanah dan kondisi tanah tersebut. Logam berat terdapat banyak pada tanah-tanah masam dan juga miskin bahan organik. Dari sebuah penelitian menyatakan bahwa pH

tanah menurun selama beberapa hari setelah aplikasi logam berat dan mikroorganisme ke dalam tanah.

4.2. Pengaruh Bioremediasi dengan Teknik *Composting* terhadap Karakteristik Tanah di PT. X

Penelitian bioremediasi dengan teknik *composting* ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan varian persentase dan jenis kompos dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon dan logam berat dalam tanah. Pengaruh dari kompos tersebut dapat dilihat berdasarkan dari hasil uji parameter utama yaitu *Total Petroleum Hydrocarbon* dan Logam Berat dengan parameter pendukung yaitu *pH*, Suhu Tanah, Kadar Air, dan Populasi Mikroba (*Total Plate Count*).

4.2.1. *pH* Tanah

Selama perlakuan, terjadi perubahan nilai *pH* potensial tanah dari hari ke 0 hingga hari ke 30 perlakuan. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi *pH* tanah adalah unsur-unsur yang terkandung dalam tanah, konsentrasi ion H^+ dan ion OH^- , mineral tanah, air hujan, dan bahan induk (Foth,1994). Pada hari ke 3, 15 dan 30 terjadi perubahan nilai *pH*. Reaktor kontrol memiliki nilai *pH* yang paling rendah, dan tidak mencapai kisaran nilai *pH* optimum (6-8) pada awal perlakuan. Pengaruh penambahan bahan organik terhadap *pH* tanah dapat menurunkan jika bahan organik yang diberikan belum masak atau bahan organik yang masih mengalami proses dekomposisi, biasanya akan menyebabkan penurunan *pH* tanah, karena selama proses dekomposisi akan melepaskan asam-asam organik yang menyebabkan menurunnya *pH* tanah.

Tabel 4.6. menunjukkan hasil pengujian *pH* yang diukur setiap hari selama 30 hari.

Tabel 4. 6. Nilai *pH* tanah tercemar pada tiap perlakuan per 3 hari pengukuran selama 30 hari (n=3)

Perlakuan	<i>pH</i> hari ke-																					
	0		3		6		9		12		15		18		21		24		27		30	
	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl
Kontrol	6,9	5,9	6,9	5,8	6,8	5,8	6,8	6,0	6,7	6,0	6,6	5,8	6,8	6,0	6,8	6,0	6,8	6,0	6,7	6,0	6,5	5,8
H 2,5	7,1	6,3	7,0	6,1	6,9	6,1	7,1	6,1	7,2	6,1	7,0	6,1	7,2	6,1	7,2	6,4	7,2	6,4	7,1	6,4	6,9	6,2
K2,5	7,1	6,5	7,0	6,5	6,9	6,5	7,4	6,5	7,4	6,6	7,3	6,5	7,4	6,5	7,4	6,7	7,4	6,7	7,4	6,7	7,1	6,6
H 5	6,9	6,7	6,8	6,6	6,8	6,6	7,2	6,6	7,1	6,6	7,1	6,6	7,2	6,6	7,2	6,8	7,2	6,8	7,1	6,8	7,0	6,6
K 5	7,3	7,0	7,2	6,9	7,1	6,8	7,4	7,1	7,4	7,0	7,3	6,9	7,4	6,9	7,4	7,0	7,4	7,0	7,3	7,0	7,2	6,9
H 10	7,3	7,0	7,2	7,0	7,2	7,0	7,3	7,0	7,3	7,0	7,2	7,0	7,2	7,0	7,2	7,0	7,3	7,0	7,2	7,0	7,1	6,8
K 10	7,6	7,2	7,4	7,1	7,3	7,0	7,4	7,1	7,4	7,1	7,2	7,0	7,4	7,0	7,4	7,0	7,4	7,1	7,3	7,1	7,1	7,0
H 20	7,6	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3	7,4	7,3	7,4	7,4	7,3	7,3	7,4	7,3	7,4	7,3	7,4	7,3	7,1	7,2	7,2	7,1
K20	7,7	7,5	7,6	7,4	7,5	7,4	7,5	7,4	7,4	7,3	7,2	7,2	7,4	7,3	7,5	7,3	7,5	7,3	7,5	7,2	7,4	7,0

Terjadi kenaikan *pH* hingga batas *pH* optimum pada hari ke 9 hingga hari ke 12, karena cuaca mulai membaik. Peningkatan pH tanah terjadi apabila bahan organik yang ditambahkan telah terdekomposisi lanjut, karena bahan organik yang telah termineralisasi akan melepaskan mineralnya, berupa kation-kation basa (Atmojo, 2003). Pada hari ke 15 terjadinya penurunan kembali dikarenakan tanah terkena hujan lebat. Pada hari ke 18 hingga hari ke 30 *pH* kembali naik dan stabil pada *pH* optimum. Hal ini juga terjadi pada penelitian (Barokah, *et.al*, 2011) mengenai penggunaan biokompos dalam bioremediasi lahan tercemar limbah minyak bumi yang mengalami kenaikan pH dari 7,25 menjadi 7,5. Kenaikan pH dikarenakan beberapa bakteri memiliki kemampuan untuk melakukan upaya homeostatis terhadap keasaman lingkungan sebatas masih dalam toleransi adaptasinya. Caranya dengan melakukan pertukaran kation K^+ dari dalam sel dan menukarnya dengan H^+ yang banyak terdapat di lingkungannya. Akibatnya keasamaan lingkungan dapat dikurangi (Chator dan Somerville, 1978).

Selama penelitian ini, semua reaktor memiliki nilai *pH* yang sesuai dengan nilai *pH* optimum karena menurut Nghia (2007) *pH* optimum untuk biodegradasi berada pada kisaran 6 sampai 8. Sedangkan menurut Wenti (2012) tingkat optimal pertumbuhan dan biodegradasi hidrokarbon dapat berlangsung pada keadaan yang cukup nutrisi, oksigen yang cukup dan *pH* antara 6 dan 9. Semua reaktor mengalami penurunan *pH* pada hari ke- 15 karena terjadi hujan sepanjang hari, dan tanah terkena hujan. Pada Kontrol, pH terus mengalami penurunan hingga hari ke-30, sementara *pH* reaktor yang diberi kompos juga mengalami penurunan namun masih mendekati nilai *pH* netral. Hal ini juga terjadi pada penelitian Wulandani (2016). Dari 28 hari penelitian, nilai pH pada masing-masing reaktor pada hari ke-0 hingga hari ke-14 cenderung netral yaitu 6. Selanjutnya mulai hari ke-21 terjadi penurunan pH menjadi 5. Pada penelitian Juliani dan Rahman (2011), hasil pengujian pH pada tiap reaktor yang dilakukan pada hari ke-0 bersifat netral yaitu 7. Selanjutnya semua reaktor menunjukkan penurunan nilai pH menjadi 6 dan 5.

Penurunan *pH* tersebut bisa disebabkan oleh aktivitas mikroba yang membentuk metabolit-metabolit asam guna dapat beradaptasi dengan lingkungan

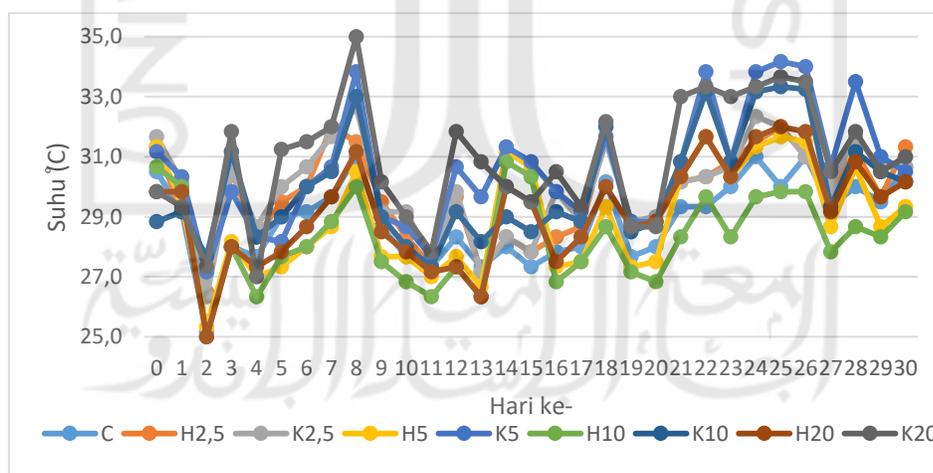
yang baru. Hal ini dapat menjelaskan penyebab dari pH yang menurun pada awal perlakuan. Pada hari ke 27 mulai terjadi penurunan pH pada semua reaktor. Terjadinya penurunan pH karena terakumulasinya asam organik (terutama asam glukonat, piruvat, sitrat, dan suksinat) yang terbentuk dari metabolisme organik (Nugroho, 2006).

Tingkat keasaman pH dapat diatasi dengan penambahan kapur pada sampel tanah dan penambahan sulfur jika pH sampel basa. Namun Departemen Konservasi Lingkungan Amerika menyatakan bahwa dalam beberapa penelitian melaporkan dengan penggunaan kapur dapat membahayakan mikroba, dan sebagai gantinya dapat digunakan magnesium (Juliani dan Rahman, 2011).

Berdasarkan Keputusan Menteri Negeri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003, nilai akhir hasil dari pengolahan minyak bumi secara biologis untuk parameter pH adalah 6 – 9 sehingga dapat disimpulkan semua sampel tanah yang di perlakuan telah memenuhi persyaratan nilai akhir untuk parameter pH .

4.2.2. Suhu Tanah

Gambar 4.4. menunjukkan suhu tanah pada semua perlakuan.



Gambar 4. 4. Suhu tanah selama 30 hari pada tiap perlakuan tanah (n=3)

Scheider dan Billingsley (1990), menyebutkan bahwa temperatur yang optimum untuk biodegradasi adalah 10° C – 40° C. Menurut Wenti (2012), suhu

dapat mempengaruhi lingkungan tumpahan minyak dan aktivitas atau populasi dari mikroorganisme. Aktivitas biologis tersebut tidak akan berjalan optimal apabila tanah tidak dapat mempertahankan suhu tertentu. Tingkat aktivitas optimum dari organisme tanah adalah suhu 18° – 30° . Sedangkan menurut Stuart (2005), kondisi optimum untuk penguraian bahan organik berada pada rentang mesofilik yaitu 20 – 45°C . Jika kurang dari 10° akan menghambat perkembangan mikroba tanah dan menghambat penyerapan hara oleh akar tanaman. Sedangkan jika lebih dari 40° maka mikroba tanah tidak aktif, kecuali mikroorganisme tertentu seperti mikroba termofilik. Suhu tanah juga menentukan reaksi kimia dan aktivitas mikroba tanah yang dapat merombak senyawa organik tertentu menjadi hara.

Pada penelitian ini, suhu tanah dalam reaktor sangat dipengaruhi oleh iklim dan cuaca di lingkungan. Untuk pengambilan semua suhu tanah selama 30 hari dilakukan pada jam yang sama agar dapat melihat perbedaan dari suhu udara dan suhu tanah saat pengambilan sampel. Suhu udara dan cuaca lingkungan pada saat penelitian dapat dilihat pada lampiran 8. Dapat dilihat pada grafik diatas bahwa suhu tanah sangat fluktuatif. Hal ini disebabkan karena reaktor tanah berada di lingkungan yang terbuka sehingga suhu udara dan cuaca harian sangat mempengaruhi suhu tanah. Penelitian juga dilaksanakan pada bulan Desember hingga Januari yang memiliki cuaca yang kontras yaitu panas namun disertai hujan.

Pada penelitian Bernal, dkk., (2009), adanya peningkatan suhu mengindikasikan peningkatan aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi *Total Petroleum Hydrocarbon*. Selama proses penguraian bahan organik, mikroorganisme akan menguraikan substrat dan menghasilkan panas, sehingga terjadi peningkatan suhu. Sementara pada penelitian ini, suhu tanah akan naik jika cuaca cerah atau berawan dan akan turun jika terjadi hujan. Suhu tanah juga dipengaruhi oleh suhu udara terendah dan tertinggi harian. Selain itu, cuaca dan suhu udara pada hari sebelumnya juga dapat mempengaruhi suhu tanah. Pada hari ke-2 terjadi penurunan suhu tanah yang diduga disebabkan karena terjadi hujan pada dini hari sehingga suhu udara menurun dan mempengaruhi suhu tanah. Lain halnya lagi pada hari ke-8 terjadi kenaikan suhu tanah dikarenakan cuaca sedang

cerah. Pada hari ke-15 terjadi hujan yang terjadi hampir satu hari penuh, namun pada grafik diatas tidak terjadi penurunan suhu tanah. Hal ini diduga disebabkan karena terpal yang menutup reaktor-reaktor tanah dapat menyimpan panas sehingga suhu tanah masih tinggi ketika diukur. Namun, dampak dari hujan pada hari ke-15 terlihat pada suhu tanah hari ke-16 yang mengalami penurunan karena tidak dilakukan penjemuran tanah pada hari ke- 15.

Dapat disimpulkan bahwa dalam penelitian ini, suhu tanah sangat dipengaruhi oleh suhu udara dan cuaca harian. Walaupun banyak faktor yang dapat menyebabkan perubahan suhu tanah seperti aktivitas mikroba namun dalam penelitian ini suhu tanah banyak dipengaruhi suhu udara dan lingkungan. Meskipun demikian, rentang suhu tanah pada semua reaktor masih dalam kisaran suhu optimum tanah yaitu $10^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ (Billingsley dan Scheider, 1990).

4.2.3. Kadar Air Tanah

Tanah biasanya memiliki kadar air berkisar antara 15% hingga 100% (Wesley, 1977). Penambahan dengan berbagai varian persentase kompos akan memberikan porositas tanah yang berbeda pula. Kompos dapat berperan sebagai *bulking agent* yang dapat meningkatkan ukuran ruang pori sehingga memudahkan proses transfer oksigen yang dibutuhkan mikroba. Meningkatnya ruang pori juga dapat meningkatkan daya tanah untuk mempertahankan kandungan airnya. Menurut Kartasapoetra dan Sutedjo (1991), pemberian bahan organik atau kompos pada tanah dapat menurunkan *bulk density* atau kerapatan tanah, karena kompos yang ditambahkan mempunyai kerapatan jenis yang lebih rendah. Bahan organik yang semakin tinggi dapat menurunkan *bulk density* tanah maka persentase ruang pori-pori semakin kasar dan kapasitas mengikat air semakin tinggi. Berikut tabel tentang hasil pengujian kadar air pada tanah sampel selama 30 hari.

Tabel 4. 7. Kadar air tanah per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Hari ke -	Kadar Air (%)								
	Kontrol	H2,5	K2,5	H5	K5	H10	K10	H20	K20
0	10	15	12	17	15	19	17	28	19
3	22	30	24	38	31	40	32	44	39
6	31	42	34	44	42	44	41	50	44
9	30	50	37	46	52	47	51	51	47
12	42	51	41	47	53	48	50	53	51
15	44	54	45	47	55	51	54	58	54
18	42	50	43	47	52	49	53	57	52
21	48	49	44	47	51	48	51	56	50
24	50	47	43	45	50	47	50	54	48
27	52	44	42	44	48	47	50	51	46
30	35	39	37	42	41	43	42	45	43

Hasil penelitian terhadap kandungan air yang terdapat di dalam tanah merupakan data penunjang hasil penelitian ini karena pengujian kadar air berfungsi untuk mengetahui kandungan air pada tanah. Jika nilainya berada di bawah 40% maka menurut Cookson (1995), proses bioremediasi akan berjalan lambat atau terganggu. Hasil penelitian terhadap kadar air di dalam tanah mengalami kenaikan yang penurunan. Dapat dilihat pada tabel perbedaan kadar air tanah pada hari ke-0, yang memiliki kadar air paling tinggi adalah tanah dengan penambahan kompos paling banyak. Namun, tanah dengan kompos hijau memiliki kadar air yang lebih tinggi di bandingkan terhadap tanah dengan kompos kandang. Oleh karena itu, pemberian air pada tanah dengan kompos kandang juga lebih banyak dibandingkan terhadap tanah dengan kompos hijau, tabel jadwal penyiraman selama 30 hari dapat dilihat pada lampiran 8.

Pada hari ke 0 hingga ke15, kadar air mengalami kenaikan. Laju kenaikan kadar air ini dipengaruhi oleh porositas tanah. Hal ini sesuai dengan penelitian Barokah, *et.al* (2011) yang mengalami kenaikan kadar air pada tanah tercemar dengan penambahan kompos. Menurutnya, penambahan kompos dapat meningkatkan porositas tanah. Kondisi ini juga akan berpengaruh pada tingkat aerasi tanah dan status kadar air tanah. Penambahan kompos sebagai tambahan

nutrien bagi mikroba juga akan meningkatkan keberadaan mikroba dalam tanah. Mikroba *indigenous* dan mikroba dari kompos dapat memanfaatkan hidrokarbon sebagai sumber energi, sehingga molekul-molekul minyak yang ada pada pori-pori tanah terlepas dan berisi dengan air.

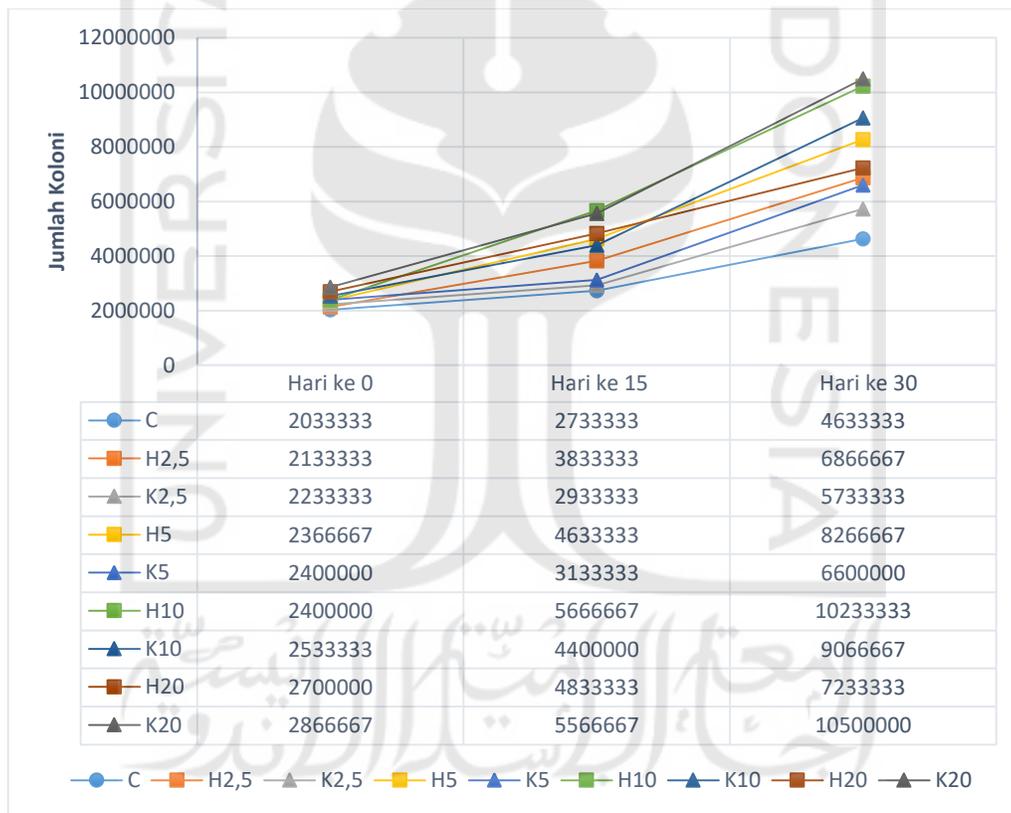
Oleh karena itu, pada tabel 4.7 dapat terlihat semakin banyak kompos pada tanah maka semakin cepat pula tanah tersebut menyimpan kandungan air yang lebih banyak. Dengan kemampuan mengikat air yang baik, maka penguapan air dari tanah akan berkurang. Pada hari ke 18 hingga ke 30 kadar air mengalami penurunan. Penyebab dari berkurangnya kadar air ini salah satunya adalah akibat penyerapan H₂O oleh mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon. Mikroorganisme dalam melakukan metabolisme memerlukan H₂O sebagai pereaksi. Penambahan kompos hijau dan kompos kandang memiliki kemampuan menyerap air lebih besar, sehingga mampu mempertahankan kelembaban tanah. Penurunan *TPH* dan kelembaban menunjukkan bahwa kandungan air yang optimal mengakibatkan efisiensi penurunan *TPH* meningkat karena adanya proses transfer nutrisi bagi mikroba pendegradasi berjalan optimal.

Penurunan kadar air juga terjadi pada penelitian Juliani dan Rahman (2011). Terjadi penurunan kadar air yang disebabkan karena proses aerasi/pengadukan yang dilakukan setiap hari selama penelitian yang menyebabkan penguapan. Menurut Nugroho (2006), senyawa hidrokarbon akan mengalami degradasi secara alami karena faktor lingkungan meskipun laju degradasi berjalan lambat. Hal tersebut meliputi penguapan, teremulsi dalam air, teradsorpsi pada partikel padat, tenggelam dalam perairan serta mengalami biodegradasi oleh mikroba. Secara tidak langsung kadar air yang mengalami proses penguapan dapat menurunkan konsentrasi hidrokarbon terutama senyawa dengan berat molekul rendah yang biasanya bersifat toksik.

4.2.4. Total Plate Count

Secara mikrobiologi, terjadinya degradasi hidrokarbon yang tanah tercemar dapat diduga dengan mengetahui pengurangan atau penambahan jumlah sel

mikroba pendegradasi setiap waktu. Sel mikroba perlu dikultur dalam media kultur yang mengandung nutrisi sebagai sumber makanan bagi mikroba. Analisis biologi tambahan dilakukan dengan metode *pour plate* menggunakan media padat NA (*Nutrien Agar*). Hasil uji *TPC* akan digunakan untuk menganalisis hasil uji *TPH* lebih lanjut pada profil hasil penelitian. Aktivitas mikroba dalam tanah penelitian melibatkan 2 kelompok mikroba yaitu, kelompok mikroba yang telah ada dalam tanah tercemar hidrokarbon dan kelompok mikroba yang berasal dari kompos. Keterlibatan dari ke 2 kelompok mikroba tersebut memiliki peran yang penting dalam proses pendegradasi hidrokarbon. Berikut hasil uji biologi pada masing-masing tanah terdapat dalam gambar 4.5.



Gambar 4. 5. Total Plate Count (TPC) pada awal, tengah dan akhir penelitian (n=3)

Pada hari ke – 0, tanah dengan pemberian kompos kandang memiliki koloni bakteri yang lebih banyak dibandingkan terhadap tanah dengan pemberian kompos hijau. Hasil analisis parameter *TPC* menunjukkan bahwa secara keseluruhan bakteri

mampu bertahan dan berkembang biak pada hari ke – 15. Namun, jumlah koloni mikroba pada tanah dengan kompos hijau lebih banyak di bandingkan terhadap tanah dengan kompos kandang. Hal ini menandakan bahwa mikroba yang ada pada kompos kandang tidak dapat menyesuaikan diri terhadap lingkungan baru sehingga mengalami kematian. Hal ini sesuai dengan penelitian Juliani dan Rahman (2011). Pada minggu pertama akan ada kemungkinan mikroba berada pada fase adaptasi. Namun pada minggu-minggu berikutnya, mikroba yang mampu bertahan sudah dapat beradaptasi dan berkembang biak dengan cepat karena mikroba *indigenous* telah terbiasa dengan kondisi toksik tanah tercemar hidrokarbon dan mampu bertahan hidup serta berkembang biak dalam kondisi lingkungan reaktor.

Jumlah koloni terbanyak pada hari ke-30 dari masing-masing jenis kompos yaitu H10 dan K20. Dari data pada gambar 4.5 juga menunjukkan bahwa penambahan kompos yang semakin banyak tidak memberikan sumbangan mikroba yang semakin banyak pula. Walaupun terjadi pertumbuhan jumlah koloni bakteri pada semua tanah, namun laju pertumbuhan koloni pada 30 hari penelitian ini lebih banyak dipengaruhi faktor lain seperti kadar air yang sangat mempengaruhi pertumbuhan mikroba. Semua perlakuan memiliki pH dan suhu tanah yang optimal, namun parameter pendukung yang sangat terlihat perbedaannya yaitu kadar air. Hal ini ditunjukkan oleh data tanah H20 dengan penambahan kompos hijau paling banyak memiliki jumlah koloni yang lebih sedikit dibandingkan H10, karena kadar air H20 yang cenderung mendekati 60%. Menurut Cookson (1995), pada kadar air 60% proses dari mikroba untuk mendegradasi hidrokarbon tidak berjalan optimal karena jika kadar air terlalu tinggi akan mengurangi proses transfer udara. Jadi secara tidak langsung pemberian kompos yang sesuai akan menyebabkan lingkungan yang baik bagi mikroba untuk berkembang biak.

Tanah Kontrol dengan tanpa penambahan kompos masih mengalami pertumbuhan jumlah koloni bakteri, namun tidak sebanyak tanah dengan penambahan kompos, karena tanah kontrol yang memiliki kadar air paling sedikit dibandingkan tanah lainnya. Sementara H10 dan K20 memiliki pH, suhu tanah dan kadar air yang optimal sehingga memiliki jumlah koloni mikroba yang paling besar

dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Oleh karena itu dapat dilihat bahwa penambahan kompos hanya memberi pengaruh pada aktivitas bakteri di dalam lingkungan tanah dalam reaktor namun tidak berpengaruh dalam meningkatkan jumlah koloni bakteri dalam tanah. Menurut Cookson (1995) disamping mengandung unsur nitrogen, fosfor dan kalium, kompos juga mengandung ion-ion logam yang dapat berfungsi sebagai kofaktor. Kofaktor merupakan kombinasi senyawa protein dan non-protein yang dapat memberikan ektivitas katalitik pada enzim yang diproduksi oleh bakteri.

4.2.5. Total Petroleum Hydrocarbon

Pengujian parameter *Total Petroleum Hydrokarbon (TPH)* dilakukan untuk mengetahui penurunan konsentrasi hidrokarbon dalam tanah tercemar. Pengamatan dilakukan selama 30 hari dengan 11 kali pengujian *TPH* yang dilakukan setiap 3 hari, dengan perlakuan pengadukan secara manual setiap hari dan melakukan pemberian air jika dibutuhkan. Pengadukan dilakukan untuk menjamin pertukaran oksigen yang dibutuhkan oleh mikroba untuk hidup dalam kondisi aerob.

Hasil pengujian diatas menunjukkan bahwa ada kecenderungan penurunan *TPH* pada semua perlakuan. Penurunan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan. Pertama, bakteri *indigenous* memiliki kemampuan mendegradasi hidrokarbon. Kedua, dengan adanya pengadukan dan pemberian air akan memberikan kondisi yang lebih stabil untuk bakteri *indigenous* dapat berkembang biak. Selain untuk menambah kadar air tanah, pemberian air juga dapat memberikan asupan oksigen untuk bakteri *indigenous*. Secara teori, tanah H20 dan K20 seharusnya menunjukkan penurunan *TPH* yang lebih baik dibandingkan tanah lainnya karena mengandung kompos yang lebih banyak yaitu dengan proporsi tanah tercemar dan kompos 8:2. Namun ternyata penurunan *TPH* paling baik terjadi pada tanah H10 dan K20. H10 memiliki jumlah proporsi tanah lebih banyak, yaitu dengan perbandingan tanah tercemar dan kompos 9:1. Diduga bahwa mikroba pendegradasi senyawa hidrokarbon berada dalam kondisi yang lebih baik di dalam tanah dengan proporsi tanah tercemar lebih banyak, sehingga proses degradasi

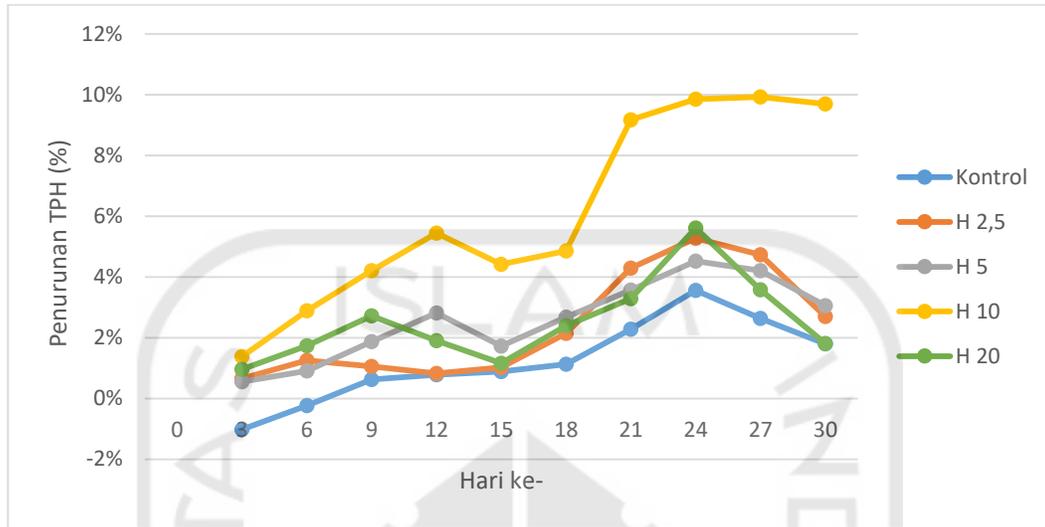
hidrokarbon berlangsung dengan baik pula. Tabel 4.8 menunjukkan hasil pengujian kadar *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)*

Menurut Nugroho (2006), penyebab mikroba tidak dapat merombak senyawa hidrokarbon bisa jadi karena mikroba yang ada dalam kompos belum pernah berhubungan dengan minyak bumi dalam proses evolusinya, atau mikroba tidak mempunyai enzim yang diperlukan dalam proses degradasi hidrokarbon. Ketika kompos dicampur dengan tanah tercemar, mikroba dari kompos belum mampu mensintesis enzim katabolik yang sesuai untuk mendegradasi hidrokarbon dari oli pelumas dan solar, bahkan mungkin mati karena tidak mampu hidup dalam kondisi yang toksik. Sebaliknya, mikroba *indigenous* yang ada dalam tanah tercemar telah terbiasa hidup dalam lingkungan yang toksik sehingga mampu mensintesis enzim katabolik untuk degradasi hidrokarbon.

Menurut Cookson (1995), senyawa hidrokarbon digunakan oleh mikroba sebagai sumber nutrisi dan sumber energi untuk melakukan metabolisme dan perkembangbiakan. Proses degradasi senyawa hidrokarbon terjadi secara mekanisme berlandaskan pada prinsip proses bioremediasi dimana mikroba hidrokarbonklastik melakukan proses perombakan senyawa hidrokarbon dengan enzim pengoksidasi hidrokarbon, sehingga mikroba mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi dengan memotong rantai hidrokarbon menjadi lebih pendek. Selain itu, mikroba hidrokarbonklastik memiliki kemampuan untuk menempel pada hidrokarbon, kesanggupan memproduksi emulsifier, serta memiliki mekanisme untuk membebaskan diri (*desorption*) dari hidrokarbon. Sistesis enzim pengoksidasi hidrokarbon dikode oleh kromosom mikroba dan plasmid yang termutasi. Mutasi kromosom dan plasmid mempengaruhi proses pemecahan molekul hidrokarbon sebagai sumber energi, mengakibatkan peningkatan populasi mikroba hidrokarbonklastik terjadi di lingkungan yang kaya akan kandungan hidrokarbon. Hal tersebut membuktikan bahwa pada penelitian ini selain penambahan kompos, senyawa hidrokarbon digunakan sebagai nutrisi dan sumber energi bagi mikroba sehingga tanah H10 dan K20 adalah kondisi paling baik bagi mikroba *indigenous*.

Tabel 4. 8. *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)* per 3 hari selama 30 hari perlakuan (n=3)

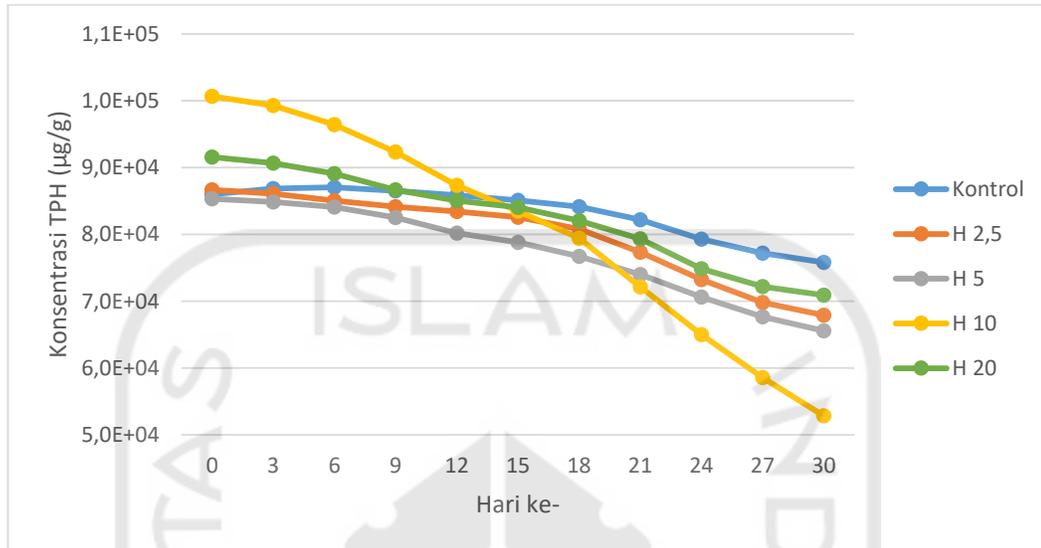
No.	Perlakuan	Kadar <i>TPH</i> ($\mu\text{g/g}$)										
		Hari ke 0	Hari ke 3	Hari ke 6	Hari ke 9	Hari ke 12	Hari ke 15	Hari ke 18	Hari ke 21	Hari ke 24	Hari ke 27	Hari ke 30
1	C	85987	86867	87067	86520	85840	85080	84120	82200	79280	77187	75800
2	H2,5	86680	86107	85027	84133	83440	82587	80813	77347	73267	69800	67920
3	K2,5	73520	73200	72867	71560	70800	70160	69400	67600	66427	65347	64373
4	H5	85347	84880	84107	82533	80213	78827	76720	73987	70640	67667	65600
5	K5	70280	69973	69360	68373	67280	66520	65707	63760	61840	60268	59013
6	H10	100653	99267	96400	92347	87320	83467	79413	72133	65027	58573	52893
7	K10	97507	96947	96027	92493	89040	86453	82840	78493	73133	68653	64653
8	H20	91560	90680	89107	86680	85027	84040	82027	79333	74880	72200	70893
9	K20	71213	70707	69773	66973	65360	64760	60507	56160	48947	41813	39093



Gambar 4. 6. Tingkat penurunan *TPH* kontrol dan kompos hijau per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Nilai *TPH* kontrol pada awal perlakuan yaitu sebesar 85.986,67 $\mu\text{g/g}$. Tingkat penurunan paling rendah pada penelitian ini terjadi pada kontrol hari ke-3 yaitu sebesar 0%. Tidak adanya penurunan nilai *TPH* karena karakteristik fisik dari tanah tercemar hidrokarbon yang cenderung menggumpal mengakibatkan tanah dan pencemar tidak homogen sehingga ketika diuji nilai *TPH* kontrol hari ke-3 lebih besar dibandingkan nilai *TPH* hari ke-0. Tingkat penurunan *TPH* kontrol masih 0% hingga hari ke-6. Ini mengindikasikan walaupun ada pengadukan dan penyiraman pada tanah tercemar hidrokarbon, reaksi awal yang terjadi yaitu tanah akan menggumpal.

Semua tanah dengan pemberian kompos hijau mulai mengalami laju penurunan nilai *TPH* paling besar pada hari ke-24 dan laju penurunan nilai *TPH* paling kecil pada hari ke-3. Hal ini dikarenakan pada hari ke-3 tanah masih beradaptasi terhadap perlakuan yang diberikan. Berdasarkan tabel 4.7, pada hari ke – 0 tanah dengan pemberian kompos hijau memiliki kadar air yang kurang dari kisaran kadar air optimum. Sedangkan pada hari ke-24, semua tanah dengan pemberian kompos hijau telah memiliki kondisi yang baik, seperti kadar air yang terpenuhi, *pH* serta suhu tanah yang stabil. Dari parameter pendukung tadi, aktivitas mikroba pendegradasi semakin meningkat sehingga terjadi penurunan nilai *TPH*.

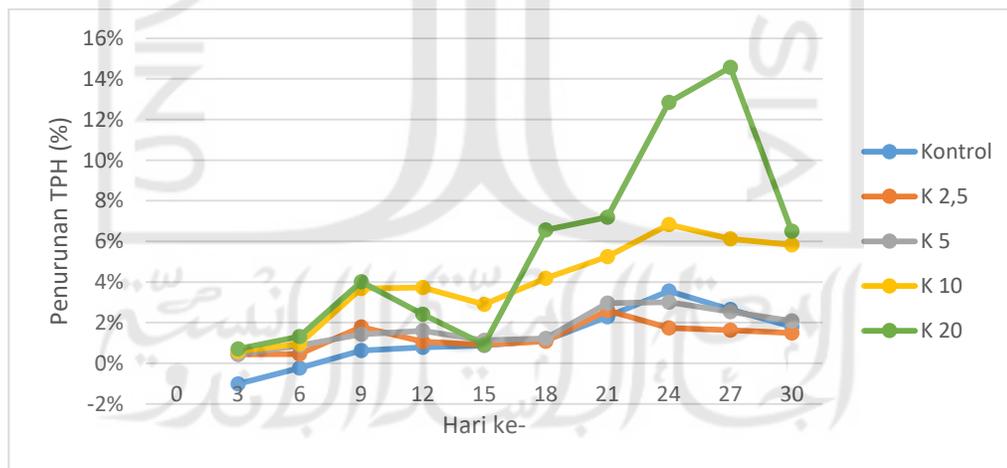


Gambar 4. 7. Penurunan konsentrasi *TPH* kontrol dan kompos hijau per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Total penurunan *TPH* untuk reaktor kontrol yaitu sebesar 10.186,67 µg/g atau 12% penurunan nilai *TPH* selama 30 hari. Walaupun reaktor kontrol hanya berupa tanah tercemar tanpa penambahan kompos, nyatanya ada penurunan nilai *TPH* yang terjadi setelah 30 hari penelitian. Hal ini bisa disebabkan karena adanya proses penghancuran awal tanah sehingga ada perubahan fisik dari tanah tercemar menjadi lebih halus. Selain itu, walaupun masih menggumpal pada awal perlakuan, dengan adanya pengadukan dan penyiraman selama 30 hari akan membantu memperbaiki kadar air, homogenitas tanah, dan proses aerasi yang terjadi dalam tanah. Kondisi dari tanah tercemar yang lebih baik akan menyebabkan peningkatan pertumbuhan mikroba *indigenous* sehingga terjadinya penurunan nilai *TPH*.

Untuk reaktor H2,5 total penurunan *TPH* sebesar 18.760 µg/g atau 22% dari total *TPH* awal. Untuk reaktor H5 total penurunan *TPH* sebesar 19.746,67 µg/g atau mengalami penurunan 23% *TPH* selama 30 hari. Untuk reaktor H10 total penurunan kadar *TPH* yaitu sebesar 47.760 µg/g atau mengalami penurunan *TPH* sebesar 47%. Sedangkan untuk reaktor H20, total penurunan *TPH* sebesar 20.666,67 µg/g atau mengalami penurunan *TPH* sebesar 23%.

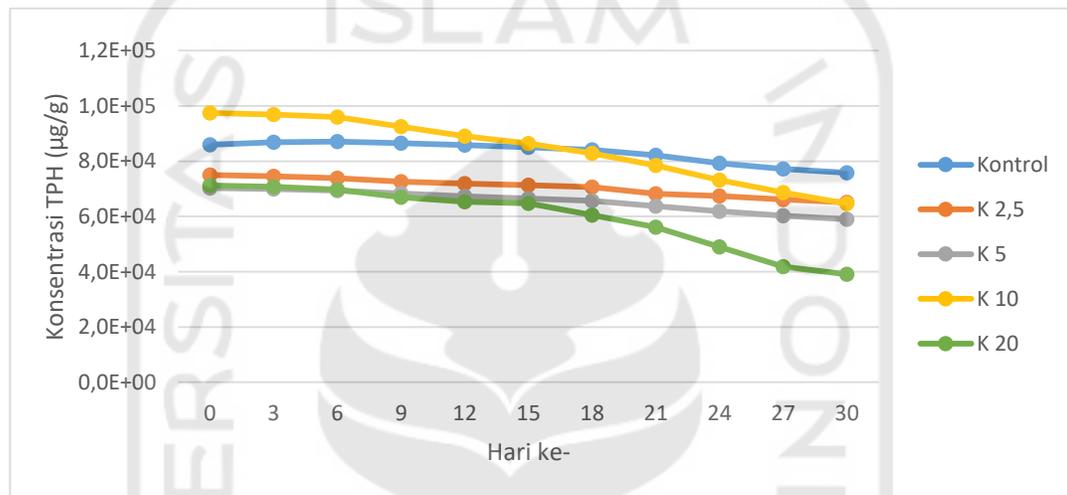
Jika tanah kontrol dibandingkan dengan tanah + kompos hijau, maka tanah + kompos hijau lebih baik dalam menurunkan kadar *TPH* dalam tanah. Namun dalam penelitian ini tanah dengan pemberian kompos hijau 10% lebih baik dalam menurunkan kadar *TPH* pada tanah tercemar. H10 mengalami penurunan *TPH* paling besar dikarenakan H10 memiliki pH, suhu tanah dan kadar yang optimum serta nilai *TPC* paling banyak dibandingkan tanah dengan pemberian kompos hijau lainnya. H20 yang memiliki persentase kompos paling besar ternyata mengalami penurunan *TPH* yang tidak jauh berbeda dengan H2,5 dan H5. Dalam penelitian ini kompos digunakan sebagai sumber nutrisi tambahan bagi bakteri pendegradasi hidrokarbon. Penurunan *TPH* pada H2,5 dan H5 lebih rendah karena persentase kompos hijau yang lebih sedikit sehingga sumber nutrisi untuk mikroba pendegradasi juga lebih sedikit. Sedangkan untuk H20 dengan persentase jumlah tanah tercemar yang lebih sedikit akan mengurangi sumber energi untuk aktivitas mikroba pendegradasi. Menurut Cookson (1995), Karbon merupakan senyawa organik yang digunakan mikroba sebagai sumber energi untuk respirasi, sehingga mikroba dapat tumbuh dan bereproduksi.



Gambar 4. 8. Tingkat penurunan *TPH* kontrol dan kompos kandang per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Semua tanah dengan pemberian kompos kandang memiliki laju penurunan *TPH* paling rendah pada hari ke-3. Sama dengan kompos hijau, kompos kandang

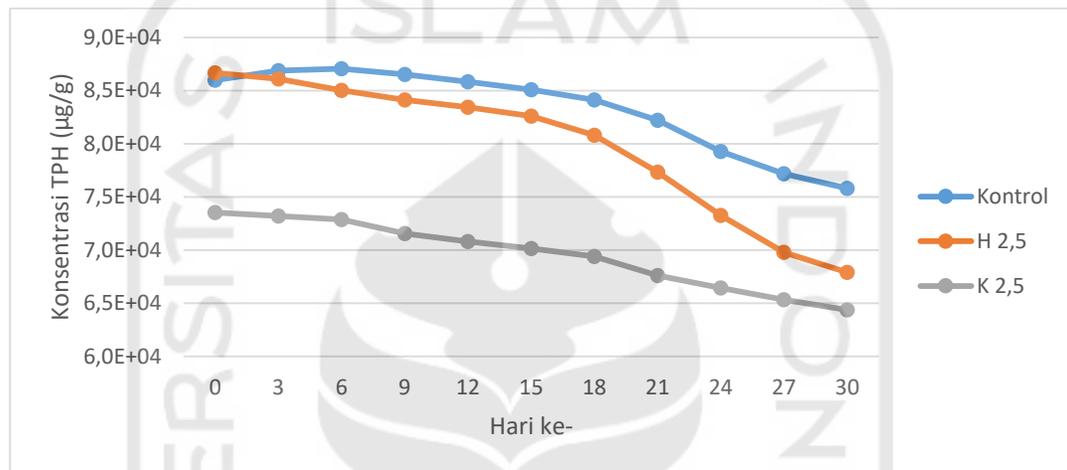
belum memiliki kadar air yang cukup. Laju penurunan *TPH* paling besar terjadi pada hari ke-24. Hal ini dikarenakan pada hari ke-24 kadar air, suhu tanah, cuaca dan *pH* sedang stabil sehingga memungkinkan mikroba pendegradasi untuk tumbuh dan berkembang biak dengan baik hingga hari ke 27 sehingga K20 mengalami laju penurunan *TPH* paling tinggi pada hari ke 27 yaitu 15%.



Gambar 4. 9 Penurunan konsentrasi *TPH* kontrol dan kompos kandang per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Jika dibandingkan dengan tanah kontrol, tanah dengan pemberian kompos kandang lebih dapat menurunkan *TPH*. Pada K2,5 total penurunan *TPH* yaitu sebesar 9.146,667 µg/g atau mengalami penurunan sebesar 12%. Total penurunan nilai *TPH* pada K5 yaitu sebesar 11.266,67 µg/g atau mengalami penurunan sebesar 16%. Pada K10 total penurunan *TPH* yaitu sebesar 32.853,33 µg/g atau mengalami penurunan sebesar 34%. Total penurunan *TPH* pada K20 sebesar 32.120 µg/g atau mengalami penurunan sebesar 45%. Dapat disimpulkan bahwa dengan pemberian kompos kandang 20% dari total berat tanah tercemar dapat menurunkan *TPH* dibandingkan dengan persentase kompos kandang lainnya. Pada pengujian *Total Plate Count*, K20 juga memiliki populasi mikroba yang paling banyak dibandingkan dengan tanah lainnya. Kadar air pada tanah K 20 juga memiliki nilai yang tinggi dibandingkan

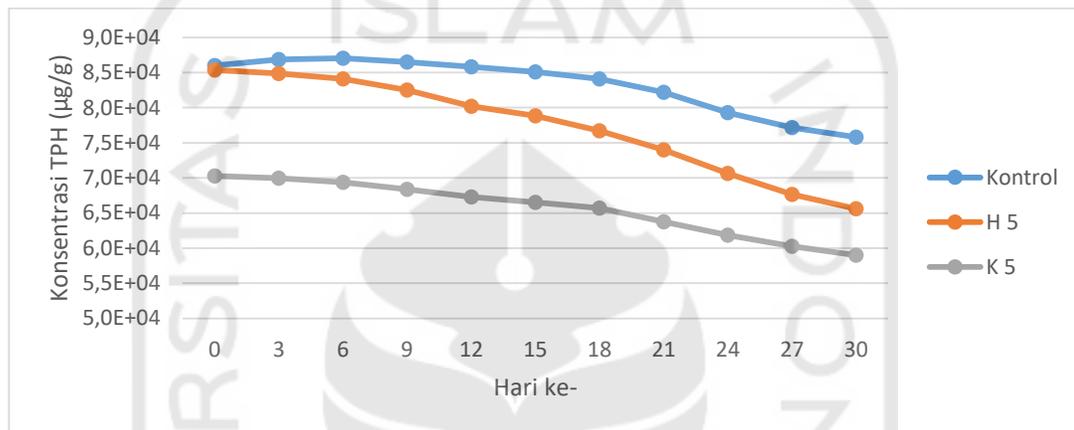
dengan tanah lainnya. Dari penjelasan diatas dapat dipastikan bahwa dalam penelitian ini terjadi penurunan kadar *TPH* pada semua tanah yang di perlakuan. Namun, setiap jenis dan banyak kompos sangat mempengaruhi terjadinya penurunan *TPH*. Untuk dapat melihat perlakuan yang lebih efisien terhadap tanah tercemar hidrokarbon, dilakukan perbandingan antar kompos dengan jumlah pemberian yang sama.



Gambar 4. 10. Penurunan konsentrasi *TPH* kontrol – kompos 2,5% per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Perlakuan H2,5 dan K2,5 memiliki proporsi tanah : kompos yang sama yaitu 4875 gram : 125 gram serta perlakuan kontrol dengan proporsi tanah tercemar 5000 gram tanpa penambahan kompos. Berdasarkan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada ketiga perlakuan mengalami penurunan hingga hari ke 30. Pada hari ke- 0, kadar *TPH* pada tanah H2,5 lebih tinggi dibandingkan dengan Kontrol dan K2,5. Namun hingga hari ke-30 H2,5 lebih banyak mengalami penurunan dibandingkan dengan Kontrol dan K2,5. Jika dilihat dari hasil akhirnya, K2,5 memiliki konsentrasi *TPH* paling kecil dibandingkan dua perlakuan lainnya. Namun, jika dilihat dari laju penurunan *TPH* selama 30 hari, H2,5 berhasil menurunkan *TPH* lebih banyak dibandingkan K2,5. Hingga hari terakhir pengujian, penurunan *TPH* pada perlakuan H,25 dengan penambahan kompos hijau 2,5% lebih besar dibandingkan dengan perlakuan Kontrol dengan persentase penurunan *TPH* sebesar 22%. Sedangkan K2,5 memiliki persentase

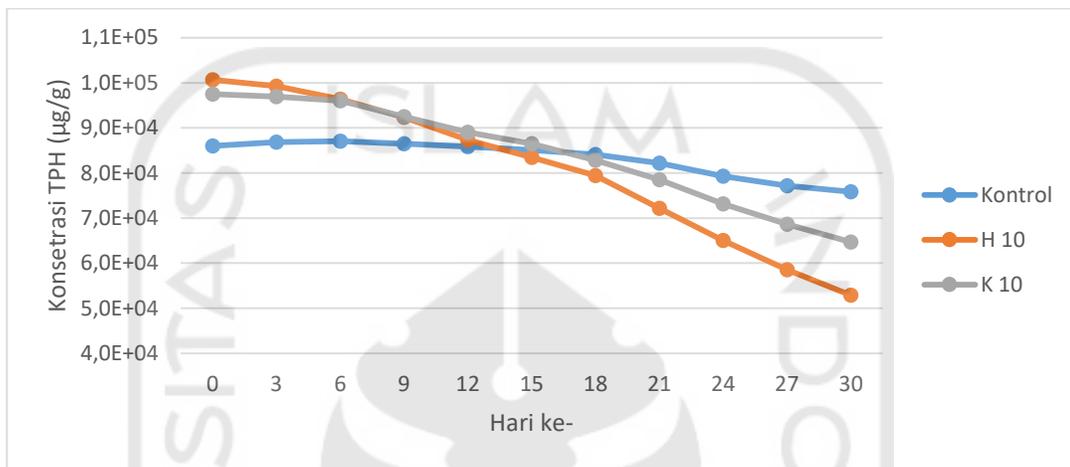
penurunan *TPH* yang sama dengan Kontrol yaitu 12%. Hasil dari parameter pendukung seperti kadar air dan TPC dari H2,5 lebih tinggi dibandingkan dengan dua perlakuan lain. Dapat disimpulkan bahwa dengan pemberian 2,5% kompos pada tanah tercemar hidrokarbon, kompos hijau lebih berpengaruh dalam bioremediasi hidrokarbon oli bekas dan solar jika dibandingkan dengan kompos kandang.



Gambar 4. 11. Penurunan konsentrasi *TPH* kontrol - kompos 5% per 3 hari selama 30 hari (n=3)

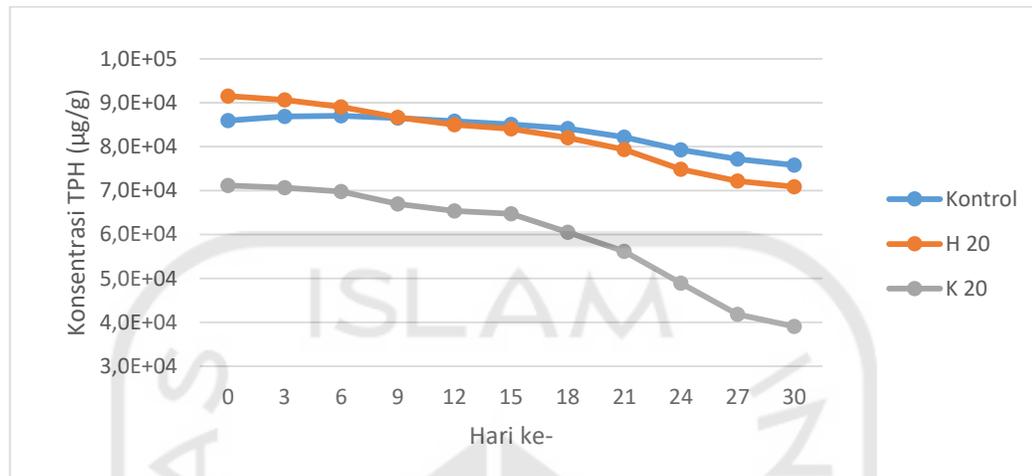
H5 dan K5 memiliki proporsi tanah : kompos yang sama yaitu 4750 gram : 250 gram. Berdasarkan gambar 4.11, dapat dilihat bahwa pada ketiga perlakuan mengalami penurunan *TPH* hingga hari ke-30. Terlihat bahwa pada hari ke-0 kadar *TPH* Kontrol memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan yang lainnya. Walaupun K5 memiliki kadar *TPH* paling rendah dibandingkan yang lain, penurunan yang terjadi lebih lambat sehingga tidak ada perbedaan yang jauh antara kadar *TPH* awal dan akhir K5. Hasil akhir dari konsentrasi *TPH* menunjukkan bahwa K5 memiliki nilai *TPH* paling kecil dibandingkan dengan dua perlakuan lain. Namun apabila dibandingkan laju penurunannya, pada hari terakhir pengujian persentase penurunan *TPH* pada H5 dengan penambahan kompos hijau 5% lebih besar dibandingkan dengan Kontrol dengan persentase penurunan *TPH* sebesar 23%. Untuk persentase penurunan *TPH* pada K5 dengan penambahan kompos kandang 2,5% lebih besar dari reaktor Kontrol yaitu 16%. Hasil dari parameter pendukung lain seperti kadar air tanah dan TPC dari

H5 memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan K5. Dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan 5% kompos pada tanah tercemar hidrokarbon, kompos hijau lebih berpengaruh dalam menurunkan nilai *TPH* dibandingkan dengan kompos kandang.



Gambar 4. 12. Penurunan konsentrasi *TPH* kontrol – kompos 10% per 3 hari selama 30 hari (n=3)

H10 dan K10 memiliki proporsi tanah : kompos yang sama yaitu 4500 gram : 500 gram. Pada gambar 4.11 dapat dilihat bahwa ketiga perlakuan mengalami penurunan *TPH* hingga hari ke-30. Di awal penelitian, H10 dan K10 memiliki konsentrasi *TPH* lebih tinggi dibandingkan dengan Kontrol. Namun, H10 dan K10 mengalami penurunan *TPH* yang lebih drastis dibandingkan Kontrol hingga akhir penelitian sehingga nilai H10 dan K10 memiliki konsentrasi *TPH* lebih kecil dibandingkan dengan Kontrol. Jika dibandingkan, H10 lebih dapat menurunkan nilai *TPH* dibandingkan dengan K10, yaitu H10 sebesar 47% dan K10 sebesar 34% sehingga H10 memiliki hasil akhir konsentrasi *TPH* yang paling rendah dibandingkan K10. Hasil dari parameter pendukung seperti kadar air dan TPC dari H10 memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan K10. Dengan persentase kompos 10%, kompos hijau lebih berpengaruh dalam menurunkan nilai *TPH* dibandingkan dengan pemberian kompos kandang.



Gambar 4. 13. Penurunan Konsentrasi *TPH* Kontrol – Kompos 20% per 3 hari selama 30 hari (n=3)

Pada gambar 4.13, terlihat *TPH* H20 lebih tinggi dibandingkan Kontrol. Namun hingga hari ke-30, nilai *TPH* H20 lebih kecil dibandingkan Kontrol karena H20 mengalami laju penurunan lebih besar dibandingkan Kontrol. Untuk K20, nilai *TPH* pada hari ke-0 lebih kecil dibandingkan Kontrol dan H20. Namun K20 mengalami laju penurunan yang besar sehingga nilai *TPH* K20 turun sangat drastis. Apabila dibandingkan pada gambar 4.12, hingga di hari ke -30 reaktor K20 yang diberi kompos proporsi yang sama dengan reaktor H20 yaitu mengalami penurunan *TPH* 50% lebih besar. Persentase penurunan *TPH* pada K20 mencapai 45%. Hal ini diduga karena dua kemungkinan. Pertama yaitu karena bakteri pendegradasi berada dalam kondisi lebih baik pada reaktor K20 dibandingkan dengan kondisi pada reaktor H20 sehingga meningkatnya aktivitas bakteri *indigenous*. Kadar air pada H20 hampir mendekati nilai 60%, yang dapat mengakibatkan kondisi anaerobik sehingga dekomposisi diperlambat. Hal ini menjelaskan kenapa H20 tidak dapat menurunkan *TPH* sebanyak K20 yang memiliki kadar air pada kisaran optimum. Jika dibandingkan, untuk pemberian kompos dengan persentase 20%, maka kompos kandang lebih berpengaruh dalam penurunan nilai *TPH* dibandingkan dengan kompos hijau.

Dari data-data yang dijelaskan diatas, dapat disimpulkan bahwa jumlah pemberian kompos sangat mempengaruhi adanya penurunan *TPH*. Kompos disini selain sebagai nutrisi tambahan, juga berfungsi memperbaiki porositas tanah sehingga kandungan air dalam tanah akan terpenuhi untuk aktivitas metabolisme mikroba pendegradasi hidrokarbon.

4.2.6. Logam Berat

Parameter utama pada penelitian ini selain *TPH* adalah Logam Berat. Logam berat yang diuji yaitu Pb dan Cd. Jenis pencemar utama pada tanah tercemar hidrokarbon di PT. X adalah oli bekas. Menurut Cindiyanti (2011), oli bekas mengandung komponen logam berat Cd dan Pb. Kadmium (Cd) merupakan unsur logam berat yang paling beracun Merkuri (Hg), serta memiliki penyebaran yang sangat luas di alam (Darmono (2006) dan Palar (2004)). Pengujian kandungan logam berat pada pengolahan minyak bumi diatur dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003. Dalam peraturan tersebut, untuk pengujian parameter logam berat hanya dilakukan sebanyak dua kali yaitu di awal penelitian dan di akhir penelitian. Berikut adalah hasil dari pengujian parameter Pb dan Cd.

Tabel 4. 9. Hasil pengujian parameter logam berat pada semua perlakuan bioremediasi tanah tercemar dengan teknik *composting* di PT. X, Yogyakarta

Pengujian	Satuan	Pb									Baku Mutu (mg/L)
		Kontrol	H2,5	K2,5	H5	K5	H10	K10	H20	K20	
Awal	mg/L	2,33	2,73	2,51	2,72	3,15	2,49	2,37	2,15	2,18	5
Akhir	mg/L	2,08	2,31	2,25	2,23	2,8	1,91	1,9	1,74	1,69	
Pengujian	Satuan	Cd									Baku Mutu (mg/L)
		Kontrol	H2,5	K2,5	H5	K5	H10	K10	H20	K20	
Awal	mg/L	0,27	0,26	0,22	0,12	0,19	0,13	0,14	0,2	0,18	1
Akhir	mg/L	0,26	0,25	0,2	0,11	0,18	0,11	0,13	0,19	0,17	

Logam berat memasuki lingkungan tanah melalui penggunaan bahan kimia yang berlangsung mengenai tanah, penimbunan debu, hujan atau pengendapan,

pengikisan tanah dan limbah buangan. Interaksi logam berat dan lingkungan tanah dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu: a) proses sorpsi atau desorpsi, b) difusi pencucian, dan c) degradasi. Besarnya penyerapan logam berat dalam tanah dipengaruhi oleh sifat bahan kimia, kepekatan bahan kimia dalam tanah, kandungan air tanah, dan sifat-sifat tanah misalnya bahan organik dan liat (Connel & Miller 1995). Jumlah normal kadar Cd di dalam tanah kurang dari 1 ppm. Cd lebih mudah di akumulasi oleh tanaman dari pada ion logam berat lainnya seperti Pb (Barchan *et al.*, 1998).

Dari hasil pengujian kedua parameter logam berat, Pb dan Cd dibawah baku mutu pada pengujian awal, serta terjadi penurunan konsentrasi Pb dan Cd pada pengujian akhir. Penurunan Pb untuk reaktor Kontrol, H2,5, K2,5 H5, K5, H10, K10, H20 dan K20 yaitu 11%; 15%; 10%; 18%; 11%; 23%; 20%; 19%; 22%. Sementara untuk penurunan Cd untuk reaktor H2,5, K2,5 H5, K5, H10, K10, H20 dan K20 yaitu 4%; 4%; 9%; 8%; 5%; 15%; 7%; 5%; 6%. Menurut Widowati (2008), Timbal (Pb) pad awalnya adalah logam berat yang terbentuk secara alami. Namun, Timbal (Pb) juga bisa berasal dari kegiatan manusia bahkan mampu mencapai jumlah 300 kali lebih banyak dibandingkan Timbal (Pb) alami.

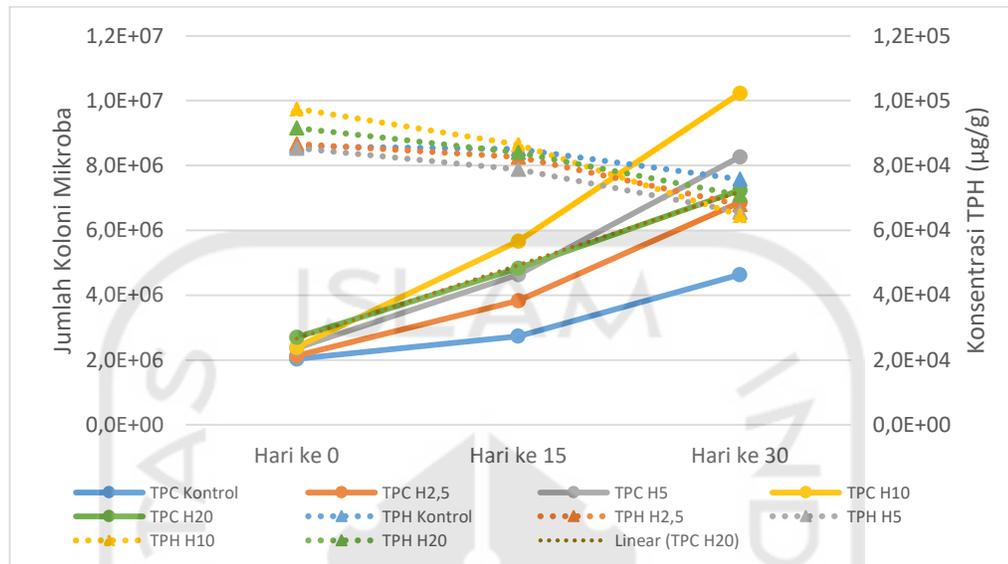
Timbal (Pb) berupa *tetra ethyl lead* dan *tetra methyl lead* banyak dipakai sebagai anti *knock* pada bahan bakar. Timbal (Pb) sebagai salah satu zat yang dicampurkan ke dalam bahan bakar yaitu $(C_2H_5)_4Pb$ atau *TEL (Tetra Ethyl Lead)*. Timbal (Pb) yang bercampur dengan bahan bakar tersebut akan bercampur dengan oli dan melalui proses di dalam mesin maka logam berat Timbal (Pb) akan keluar dari knalpot bersama dengan gas buang lainnya (Sudarmadji, 2006). Dari senyawa timbal (Pb) yang ditambahkan ke bensin, kurang lebih 70% diemisikan melalui knalpot dalam bentuk garam inorganik, 1% diemisikan masih dalam bentuk *tetraakyl lead* dan sisanya terperangkap dalam sistem exhaust dan mesin oli (Mukono, 2002). Menurut Widowati (2008), rata-rata timbal (Pb) yang terdapat di dalam tanah adalah sebesar 5 – 25 mg/kg. Keberadaan timbal di dalam tanah dapat berasal dari emisi kendaraan bermotor, dimana partikel timbal yang terlepas ke udara, secara alami dengan adanya gaya gravitasi, maka timbal tersebut akan turun ke tanah.

Mikroorganisme berpartisipasi dalam proses mobilisasi dan immobilisasi logam berat dalam tanah dengan menurunkan pH disekitar tanah tersebut. Berdasarkan penelitian Mühlbacova, *et al.* (2005) jumlah mikroorganisme dalam tanah meningkat dan konsentrasi logam berat menurun. Hal ini karena mikroorganisme tanah dapat menyerap Pb dan logam berat lainnya kedalam tubuhnya dan juga dapat berperan dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga membuat kondisi yang stabil antara logam berat dan tanah tersebut (Mühlbacova, 2002).

Untuk logam berat, penurunan paling besar terjadi pada perlakuan H10 yang memiliki pH, suhu, dan kadar air yang optimum serta memiliki nilai TPC paling tinggi. H10 juga menurunkan nilai *TPH* paling banyak dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Hal ini sesuai dengan penelitian Mühlbacova, *et al.* (2005) yaitu semakin meningkatnya jumlah mikroba maka konsentrasi logam berat menurun.

4.3. Profil Hasil Penelitian

Profil hasil penelitian adalah gabungan hasil uji parameter *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)* dan *Total Plate Count (TPC)* pada masing-masing tanah penelitian dengan penambahan jenis kompos yang sama diplotkan terhadap tanah kontrol dalam satu grafik. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap masing-masing profil hasil penelitian untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan kompos terhadap bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon.

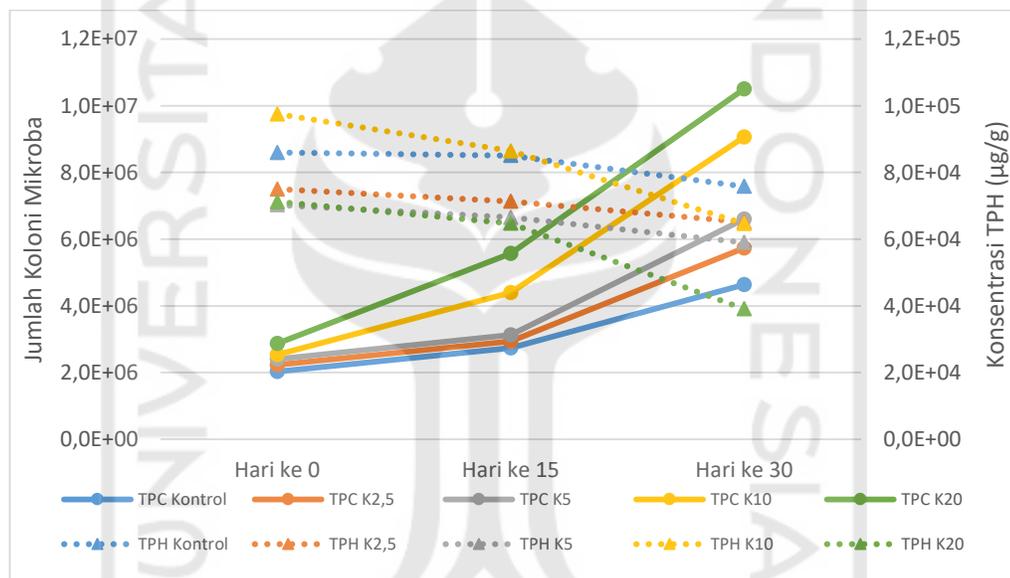


Gambar 4. 14. Profil Hasil Penelitian Perlakuan Kontrol dan Kompos Hijau

Penurunan konsentrasi *TPH* paling besar terjadi pada H10 yaitu 47%. Hasil lain yaitu, peningkatan jumlah koloni mikroba terbanyak juga terjadi pada H10. Berdasarkan gambar 4.13, semua penurunan konsentrasi *TPH* pada semua perlakuan dengan kompos hijau terjadi beriringan dengan peningkatan TPC. Kenaikan jumlah sel bakteri tersebut bersamaan dengan menurunnya *TPH*. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa penurunan *TPH* pada semua perlakuan dengan kompos hijau merupakan akibat dari aktivitas bakteri pendegradasi.

Apabila dibandingkan dengan profil hasil penelitian pada gambar 4.14, hingga di hari ke -30 perlakuan H10 mengalami penurunan *TPH* 52% lebih besar H20. Hal ini diduga karena dua kemungkinan. Pertama yaitu karena bakteri pendegradasi berada dalam kondisi lebih baik pada reaktor H10 dibandingkan dengan kondisi pada reaktor H20 sehingga meningkatnya aktivitas bakteri *indigenus*. Kemungkinan kedua yaitu adanya aktivitas dari bakteri *indigenus* yang membantu menurunkan *TPH*. Lasari (2010) menyatakan bahwa bakteri yang mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi disebut dengan hidrokarbonklastik. Dalam penelitian ini, kemungkinan besar aktivitas bakteri berasal dari bakteri *indigenus*. Zhu, et al (2001) menyatakan

bahwa pada lingkungan yang telah terkontaminasi minyak bumi dimungkinkan terdapat bakteri pendegradasi *petroleum hydrocarbon* yang secara alamiah bersaing dan berkonsorsia dengan mikroorganisme lainnya. Hal ini serupa dengan tanah tercemar hidrokarbon yang diambil di PT. X. Dimungkinkan terdapat bakteri hidrokarbonoklastik yang secara alami hidup di dalam tanah tercemar dan mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang ekstrim. Sehingga ketika tanah tercemar dipindahkan ke dalam reaktor penelitian, bakteri indigenous yang ada di dalam tanah tercemar tetap tumbuh.



Gambar 4. 15. Profil Hasil Penelitian Perlakuan Kontrol dan Kompos Kandang

Berdasarkan gambar 4.15., dapat dilihat bahwa pada terjadi kenaikan jumlah sel bakteri semua perlakuan. Kemungkinan fase adaptasi terhadap lingkungan baru berada di 1 minggu pertama, sehingga walaupun ada kemungkinan bakteri mengalami kematian, pada pengujian hari ke -15 nilai TPC telah meningkat. Hal ini diduga karena bakteri *indigenous* telah beradaptasi dengan adanya penambahan kompos dan lingkungan reaktor. Menurut Suyasa (2007), pertumbuhan bakteri pada fase eksponensial dipengaruhi oleh sifat genetik yang diturunkannya, kadar nutrisi dalam media, suhu inkubasi, kondisi pH, dan aerasi. K20 mengalami penurunan paling besar

dibandingkan dengan tanah dengan kompos kandang lainnya yaitu 45%. Hal ini menunjukkan dengan adanya penambahan kompos memberikan pengaruh yang positif bagi aktivitas mikroba pendegradasi untuk menurunkan *TPH*. Penurunan *TPH* bersamaan dengan meningkatnya nilai *TPC*. Oleh sebab itu, dapat dikatakan bahwa penurunan *TPH* pada semua perlakuan dengan penambahan kompos kandang merupakan akibat dari aktivitas bakteri pendegradasi.

Setiap perlakuan dengan jenis kompos yang sama maupun berbeda mengalami penurunan yang berbeda. Perbedaan penurunan *TPH* tersebut disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor yang pertama, kompos sebagai penyedia nutrisi tambahan seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dibutuhkan bakteri pendegradasi dalam melakukan aktivitasnya. Faktor yang kedua yaitu kompos mampu berperan sebagai *bulking agent* yang dapat meningkatkan ukuran ruang pori tanah sehingga memudahkan proses transfer oksigen yang dibutuhkan mikroba. Oksigen dibutuhkan oleh mikroba sebagai akseptor elektron dalam proses oksidasi hidrokarbon untuk menghasilkan energi dan reaksi enzimatik tertentu (Munawar dkk., 2007). Meningkatnya ukuran pori tanah akan meningkatkan kemampuan tanah untuk mengikat air, sehingga kandungan air dalam tanah akan terpenuhi. Hal tersebut dibuktikan oleh reaktor H10 dengan penambahan kompos hijau 10% menunjukkan hasil penurunan *TPH* yang paling maksimal. *Bulking agent* mampu memberikan porositas tanah lebih besar untuk pertukaran oksigen dan meningkatkan kemampuan mengikat air dalam tanah. Menurut Lua *et al.* (2007), kadar air mempunyai peran kritis dalam rekayasa pengomposan karena dekomposisi material organik bergantung pada ketersediaan kandungan air. Kadar air yang optimal adalah 45% s.d 55% (Hoitink, 2008). Apabila kadar air melebihi 60% maka volume udara berkurang, bau akan dihasilkan (karena kondisi anaerobik), dan dekomposisi diperlambat.

Hal ini dapat menjelaskan mengapa penurunan *TPH* tanah dengan pemberian kompos hijau 20% lebih rendah dibandingkan dengan pemberian kompos hijau 10%. Tanah H20 memiliki kadar air yang paling tinggi dibandingkan tanah yang lain dan hampir mencapai 60% dari kadar air tanah sehingga proses degradasi hidrokarbon

akan terganggu. Dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan kompos pada tanah tercemar hidrokarbon hanya sebagai nutrisi tambahan dan *bulking agent* bagi tanah sehingga kompos turut berperan dalam menciptakan kondisi lingkungan yang ideal bagi mikroba. Pemberian proporsi kompos yang sesuai akan memberikan penurunan *TPH* yang maksimal, karena dengan proporsi kompos yang tepat maka akan tercipta lingkungan yang baik untuk mikroba pendegradasi hidrokarbon.

Menurut Venosa dan Zhu. (2003), banyak penelitian mengenai bioremediasi dengan penambahan kompos sebagai nutrien organik yang menunjukkan hasil yang lebih efektif dalam menangani pencemaran dari minyak bumi. Namun dalam proses, kondisi dan komposisi penambahan kompos yang paling optimal masih belum ditemukan. Jenis dan konsentrasi nutrien yang optimal sangat bervariasi tergantung dengan properti minyak dan kondisi lingkungan. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Efsun Dindar, dkk (2015) mengenai biodegradasi oli bekas pada lahan pertanian di Desa Balabancik, Provinsi Bursa, Turkey menggunakan kompos yang berasal dari *sludge* limbah makanan menunjukkan penurunan *TPH* pada inkubasi 28° C sebesar 56% pada dosis oli 0,5% dan 74% pada dosis oli 5%. Studi mengenai bioremediasi tanah terkontaminasi *crude oil* dilakukan oleh Chorom, dkk. (2010) dengan memanfaatkan kompos NPK. Hasil yang diperoleh adalah terjadi penurunan *TPH* sebesar 45-60% seiring dengan penambahan jumlah koloni bakteri heterotrof dalam kurun waktu 10 minggu. Reaktor dengan perlakuan penambahan NPK menunjukkan kenaikan jumlah sel bakteri yang cukup signifikan dibandingkan dengan reaktor kontrol. Degradasi minyak rata-rata seluruh reaktor pada minggu ke 5 lebih tinggi dibandingkan pada minggu ke 10. Penelitian lainnya dilakukan oleh Setyowati (2008), mengenai bioremediasi tanah tercemar *crude oil* dengan penambahan kompos daun angkana dan glodogan selama 8 minggu mengalami penurunan *TPH* sebesar 95,76%. Selain itu penelitian yang dilakukan Wulandani (2016) mengenai bioremediasi tanah tercemar *crude oil* dengan proporsi tanah : *crude oil* 225 gram : 75 gram dan penambahan kompos 10% berhasil menurunkan nilai konsentrasi *TPH* sebesar 41,087%.

Dalam penelitian ini, penambahan kompos pada bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon memberikan hasil positif terhadap degradasi senyawa hidrokarbon. Kompos lebih berperan sebagai sumber nutrisi tambahan dan *bulking agent* yang meningkatkan porositas tanah sehingga pertukaran oksigen berlangsung dengan baik. Namun kompos tidak berperan sebagai sumber mikroba pendegradasi. Dalam kurun waktu 30 hari, proses bioremediasi pada reaktor H10 dengan kompos hijau 10% mampu mendegradasi hidrokarbon (*TPH*) hingga 47% dan pada reaktor K20 dengan kompos kandang 20% mampu menurunkan *TPH* hingga 45%. Penurunan tersebut masih cukup rendah dibandingkan dengan hasil penelitian lain. Hal ini terjadi diduga karena waktu penelitian yang sangat singkat, sehingga hasil degradasi belum maksimal. Persentase penurunan *TPH* dapat menjadi lebih tinggi jika waktu penelitian diperpanjang.

