

**PENGARUH KECEPATAN HISAP ROKOK  
TERHADAP EMISI RADIKAL BEBAS**

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**IRFANUDIN RIDHO  
0510930034-93**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2012**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



# LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

## PENGARUH KECEPATAN HISAP ROKOK TERHADAP EMISI RADIKAL BEBAS

Oleh:

IRFANUDIN RIDHO

0510930034-93

Telah dipertahankan di depan Majelis Penguji  
pada tanggal \_\_\_\_\_  
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

Pembimbing I

Pembimbing II

Drs. Arinto Yudi P.W., M.Sc., Ph.D  
NIP. 196407021989031001

Dra. S.J. Iswarin, M.Si., Apt.  
NIP. 195107281984032001

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Fisika  
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Drs. Adi Susilo, M.Si., Ph.D  
NIP. 196312271991031002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : IRFANUDIN RIDHO  
NIM : 0510930034  
Jurusan : FISIKA  
Penulisan Tugas Akhir berjudul :

### **PENGARUH KECEPATAN HISAP ROKOK TERHADAP EMISI RADIKAL BEBAS**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Tugas Akhir ini adalah benar-benar karya saya sendiri, dan bukan hasil jiplakan dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam Daftar Pustaka Tugas Akhir ini, semata-mata digunakan sebagai acuan/referensi.
2. Apabila kemudian hari diketahui bahwa isi Tugas Akhir saya merupakan hasil jiplakan, maka saya bersedia menanggung akibat ukum dari keadaan tersebut.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, ..... 2012  
Yang menyatakan,

Irfanudin Ridho  
05109300340

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



# PENGARUH KECEPATAN HISAP ROKOK TERHADAP EMISI RADIKAL BEBAS

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara variasi kecepatan hisap rokok dengan emisi radikal bebas yang dihasilkan. Sampel rokok dari merek-merek berbeda: merek lokal dan nasional di hisap dengan kecepatan tertentu: 0.10 m/s, 0.16 m/s, dan 0.17 m/s. Kemudian filter rokok dianalisis menggunakan ESR untuk mengidentifikasi radikal bebas yang berada pada filter. Identifikasi radikal bebas didapat dengan menentukan sebuah pola Lissajous, dimana pola Lissajous tersebut merupakan hasil resonansi dari sinyal yang dihasilkan oleh sampel dan sinyal osilator. Frekuensi dan arus pada ESR digunakan untuk menghitung nilai faktor-g. Terakhir, nilai faktor-g dibandingkan dengan referensi untuk mengidentifikasi jenis radikal bebas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap merek rokok menghasilkan radikal bebas  $O_2^-$ . Jenis radikal bebas lainnya dihasilkan bergantung pada merek rokok dan kecepatan hisap.

**Kata kunci:** asap rokok, kecepatan hisap, radikal bebas, ESR, faktor-g.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



# ANALYZING THE RELATION BETWEEN SPEED OF SMOKE INHALED FROM CIGARRETE AND FREE RADICAL EMISSION

## ABSTRACT

This study was to analyze the relation between the velocity of smoke inhaled and free radicals emitted from the cigarette smoke. The aim was to measure the emitted free radicals from cigarette smoke inhaled to the different speed. The samples of cigarette from different brands: local and national brand was inhaled with a different speed such: 0.10 m/s, 0.16 m/s, dan 0.17 m/s. Then the filter was analyzed using ESR to identify free radicals trapped by the filter. The identification of free radicals was conducted by determining a Lissajous pattern which is a result of a resonance of the signal produced by the sample and the given signal from the oscillator. The frequency and current of the ESR was measured to calculate the g-factor. Finally, the g-factor was compared to the reference to identify the free radicals.

The results showed that each cigarette produced  $O_2^-$  free radicals. The rest of the emitted free radicals were depended on brand cigarette and the speed burning process.

**Keywords:** Cigarette smoke, inhaled velocity, free radicals, ESR, g-factor.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini tepat pada waktunya – 7 tahun. Proses ini begitu menyita pikiran hingga sulit untuk tidur.

Terima kasih yang utama ditujukan pada Bue, dimana beliau telah memberikan kesempatan kedua pada penulis untuk dapat mengejar cita-cita – mengubah dunia. Penulis berharap semoga cita-cita Bue – *menguliahkan* seluruh bangsa Indonesia - ter kabul. Amin.

Ucapan terima kasih selanjutnya ditujukan pada bapak Arinto Yudi yang dengan sabar dan keteladanan telah menyediakan waktu untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Tak lupa, ucapan terima kasih juga penulis sampaikan untuk bapak Tarib dan ibu Zainab yang telah memberi motivasi dan dorongan untuk menyelesaikan studi S-1 ini sehingga penulis memiliki kepercayaan diri. Kemudian kepada Mas Ubaidillah (2004) penulis ucapkan terima kasih atas *early editing*-nya. Untuk Ridwan Awal (2006) dan Arif Darmawan (2004) penulis sampaikan terima kasih atas bantuannya dalam perancangan alat penghisap.

Terakhir, penulis berharap pada kedua teman spesial, yakni Hardiana Putra dan Almaarif, agar tetap mengikuti jalan yang lurus, meski terkadang harus sedikit “gila-gilaan”.

Semoga penelitian ini ada manfaatnya.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1. Tinjauan Umum Rokok .....	5
2.1.1. Mekanisme Terbentuknya Asap .....	6
2.1.2. Tinjauan Asap Mainstream Rokok .....	8
2.1.3. Sifat Fisis Pada Asap Rokok .....	8
2.1.4. Sifat Kimia Dari Asap Rokok.....	10
2.1.5. Biomassa Pada Rokok .....	11
2.2. Emisi Pada Asap Rokok .....	13
2.2.1. Tar Dan Filter .....	13
2.2.2. <i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)</i> .....	15

2.2.3. Volatile Organic Compounds (VOC).....	16
2.2.4. Particulate Matter (PM).....	16
2.2.5. Radikal Bebas.....	17
2.2.6. Senyawa Serupa Dioxin.....	17
2.2.7. Nitrosamine.....	17
2.3. Efek Kesehatan.....	18
2.4. Metode Deteksi Partikel Asap Rokok.....	21
2.4.1. Electron Spin Resonance.....	22
2.4.2. Osiloskop.....	29
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>31</b>
3.1. Waktu Dan Tempat Penelitian.....	31
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	31
3.3. Prosedur Penelitian.....	32
3.3.1. Perancangan Alat Penghisap.....	35
3.3.2. Kalibrasi Alat Penghisap.....	35
3.3.3. Pembakaran Sampel.....	36
3.3.4. Pendeteksian Radikal Bebas.....	36
3.3.5. Pencatatan Nilai Frekuensi Dan Arus.....	42
3.3.6. Perhitungan Nilai B dan faktor-g.....	43
3.3.7. Penentuan Jenis Radikal Bebas.....	44
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>47</b>
4.1. Kalibrasi Terhadap 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH).....	47
4.2. Pengaruh Kecepatan Hisap Terhadap Emisi Radikal Bebas.....	48
4.3. Pembahasan.....	52
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>57</b>

5.1. Kesimpulan.....	57
4.2.Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN 1 .....	61
LAMPIRAN 2 .....	62
LAMPIRAN 3 .....	63
LAMPIRAN 4 .....	73



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Jadwal rencana pengerjaan tugas akhir .....	31
Tabel 3.2. Kecepatan rata-rata alat penghisap.....	36
Tabel 4.1. Data pengamatan untuk DPPH .....	47
Tabel 4.2. Nilai faktor-g dan jenis radikal bebas untuk kecepatan hisap v1 (0.10 m/s).....	49
Tabel 4.3. Nilai faktor-g dan jenis radikal bebas untuk kecepatan hisap v2 (0.16 m/s).....	50
Tabel 4.3. Nilai faktor-g dan jenis radikal bebas untuk kecepatan hisap v3 (0.17 m/s).....	51



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sebatang rokok saat dibakar (Baker, 2006).....	6
Gambar 2.2. Diagram proses saat rokok dibakar (Baker, 2006) .....	7
Gambar 2.3. Hubungan antara medan magnet dan energi.....	23
Gambar 3.4. Osiloskop digital Tectronix TDS1001B.....	30
Gambar 3.1. Alur Penelitian.....	33
Gambar 3.2. Alur Penelitian (Lanjutan).....	34
Gambar 3.1. Blok diagram alat penghisap rokok.....	35
Gambar 3.2. Integrasi osiloskop dengan ESR control unit.....	37
Gambar 3.3. ESR control unit.....	38
Gambar 3.4. ESR basic unit.....	38
Gambar 3.5. ESR adapter.....	38
Gambar 3.6. Sepasang koil helmholtz.....	38
Gambar 3.7. ESR basic unit.....	39
Gambar 3.8. Osiloskop digital.....	40
Gambar 4.1. Tiga Jenis Pola Lissajous dari DPPH.....	47



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## DAFTAR LAMPIRAN

### LAMPIRAN 1

Tabel L.1.1. Data kalibrasi kecepatan hisap.....	61
--	----

### LAMPIRAN 2

Tabel L.2.1. Referensi faktor-g.....	62
--------------------------------------	----

### LAMPIRAN 3

Tabel L.3.1. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RN-1.....	63
Tabel L.3.2. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RN-2.....	64
Tabel L.3.3. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RN-3.....	65
Tabel L.3.4. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RN-4.....	66
Tabel L.3.5. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RN-5.....	67
Tabel L.3.6. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RL-1.....	68
Tabel L.3.7. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RL-2.....	69
Tabel L.3.8. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RL-3.....	70
Tabel L.3.9. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RL-4.....	71
Tabel L.3.10. Data Hasil Pengamatan Untuk Sampel RL-5.....	72

### LAMPIRAN 4

Gambar L.4.1. Pola Lissajous Untuk Sampel RL-1.....	73
Gambar L.4.2. Pola Lissajous Untuk Sampel RL-2.....	73
Gambar L.4.3. Pola Lissajous Untuk Sampel RL-3.....	74
Gambar L.4.4. Pola Lissajous Untuk Sampel RL-4.....	74
Gambar L.4.5. Pola Lissajous Untuk Sampel RL-5.....	75
Gambar L.4.6. Pola Lissajous Untuk Sampel RN-1.....	75
Gambar L.4.7. Pola Lissajous Untuk Sampel RN-2.....	76
Gambar L.4.8. Pola Lissajous Untuk Sampel RN-3.....	76
Gambar L.4.9. Pola Lissajous Untuk Sampel RN-4.....	77
Gambar L.4.10. Pola Lissajous Untuk Sampel RN-5.....	77

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebiasaan merokok sudah menjadi kewajaran yang terjadi pada masyarakat umum dan merupakan sebuah isu yang paling kontroversial. Banyak isu yang memojokkan bahwa merokok merupakan sesuatu yang sangat berbahanya, namun banyak pihak pula yang mengabaikannya. Pemojokan tersebut antara lain dilakukan melalui jalur kesehatan, yakni merokok mengakibatkan berbagai penyakit. Jalur moralpun ditempuh, yakni merokok merupakan sesuatu yang tidak sopan, atau menghambur-hamburkan uang, dan merupakan sesuatu yang tidak bermanfaat. Bagi seorang perokok, merokok merupakan sebuah jalan untuk menjadi mencapai ketenangan pikiran.

Sebatang rokok yang dibakar terlihat sangat sederhana. Pada saat proses yang terjadi dianalisa, maka akan didapati mekanisme yang begitu kompleks dari pembakaran sebatang rokok. Selain proses yang terjadi, juga bisa dianalisis kandungan apa yang ada pada asap rokok.

Pada saat ini diperkirakan sekitar 1,25 miliar penduduk dunia adalah perokok. Separuh dari mereka meninggal akibat penyakit yang berhubungan dengan tembakau, sehingga membuat merokok merupakan masalah kesehatan yang paling serius. Bahaya tersebut antara lain timbul karena adanya radikal bebas yang terkandung pada asap rokok.

Jumlah perokok di Indonesia pada tahun 1995 sebanyak 34,7 juta jiwa, dimana 33,8 juta perokok laki-laki dan 1,1 juta perokok perempuan. Sementara pada tahun 2011, perokok di Indonesia menjadi 65 juta jiwa, dimana 60,4 juta perokok laki-laki dan 4,8 juta perokok perempuan (Antarnews, 2011). Pada 2009, produksi rokok Indonesia mencapai 245 miliar batang (Menteri Perindustrian, 2009).

Pengetahuan tentang hubungan antara kecepatan hisap dan radikal bebas yang dihasilkan oleh rokok produksi Indonesia masih belum diketahui. Oleh karena itu, kiranya berguna untuk mengadakan

penelitian tentang radikal bebas pada asap rokok. Asap rokok mengandung berbagai zat berbahaya. Salah satu dari zat-zat berbahaya tersebut antara lain adalah radikal bebas. Radikal bebas merupakan senyawa yang kekurangan atau kelebihan elektron sehingga ia akan mengikat pada senyawa lain untuk mencapai kestabilan. Karena radikal bebas tersebut masuk dalam system tubuh, maka yang dirusak tidak lain adalah tubuh itu sendiri. Akibat ini semua, maka dikenal berbagai dampaknya antara lain adalah kanker paru-paru dan tumor mulut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui jenis-jenis radikal bebas yang dihasilkan sesuai dengan variasi kecepatan hisap rokok.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan permasalahan diatas, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

- a. Apa saja jenis radikal bebas pada asap rokok
- b. Bagaimana pengaruh kecepatan hisap rokok terhadap jenis radikal bebas

## **1.3. Batasan Masalah**

Agar penelitian ini lebih terfokus, maka permasalahan tersebut akan dibatasi hanya pada:

- a. Rokok yang diproduksi di Indonesia baik produksi nasional maupun lokal di Malang.
- b. Kecepatan hisap divariasi menurut kemampuan dari alat penghisap.
- c. Tidak menghitung konsentrasi radikal bebas.
- d. Tidak membahas efek fisis dari perbedaan kecepatan hisap.

## **1.4. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk

- a. Mengidentifikasi radikal bebas yang dihasilkan oleh asap rokok dari berbagai macam rokok yang beredar di Indonesia
- b. Menentukan hubungan antara kecepatan hisap dengan emisi radikal bebas yang dihasilkan pada asap rokok.

## 1.5. Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan ada manfaat yang didapat, yaitu:

- a. Diketuinya radikal bebas yang dihasilkan asap rokok yang dihasilkan dari rokok di Indonesia
- b. Diketuinya pengaruh kecepatan hisap terhadap radikal bebas yang dihasilkan.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Tinjauan Umum Rokok

Pada 1492, Christopher Columbus kembali ke Eropa dari Amerika dengan membawa daun dan bibit tembakau pertama yang pernah dilihat di dunia. Duta besar Prancis untuk Portugal, Jean Nicot, mendapatkan bibit tembakau di Lisbon dan memperkenalkan tanaman tersebut ke Prancis pada tahun 1561. Untuk menghormatinya, maka Carolus Linnaeus menamakan tembakau sebagai genus *Nicotina* pada tahun 1753 (Thielen, 2007).

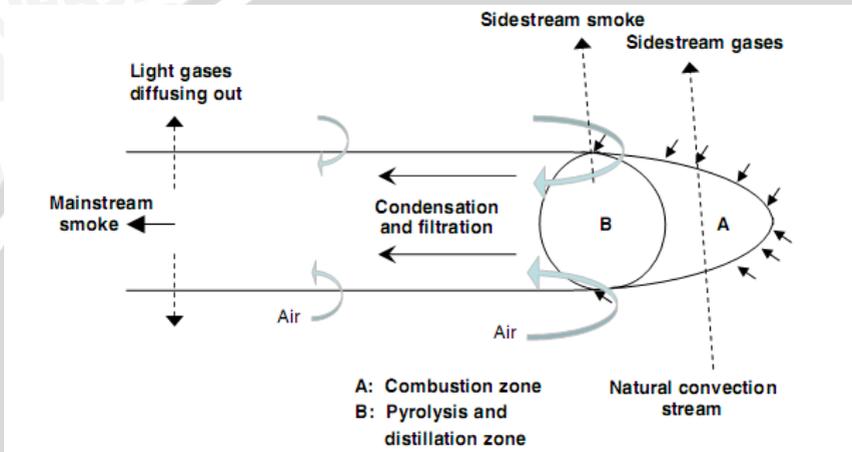
Pada abad ke-18, *snuff* dan rokok pipa merupakan hal paling populer dari penggunaan tembakau dan abad ke-19 merupakan abad rokok. Pada awalnya, rokok merupakan kebiasaan bangsa Turki yang kemudian diadopsi oleh bangsa Inggris sejak perang Crimean. Penemuan mesin untuk pembuatan rokok pada tahun 1850-an membuka jalan untuk produksi massal dan pada abad 20 merupakan abad pengembangan rokok modern. Pada tahun 2000, konsumsi rokok dunia mencapai 5,6 triliun batang (Thielen, 2007).

Utamanya hanya tiga jenis tembakau yang digunakan sebagai bahan rokok dunia: Virginia, Burley dan Oriental. Perbedaan tipe tembakau dan metode pengeringan daun setelah panen mengakibatkan beda cita rasa dan komposisi asap pada rokok (Thielen, 2007).

Asap tembakau merupakan aerosol dari titik-titik cairan (fase partikel) yang tersuspensi dalam campuran senyawa gas dan semi-volatile. Asap rokok terbagi menjadi asap "mainstream", asap sidestream dan asap tembakau sekitar (Environmental tobacco smoke - ETS). Asap rokok mainstream merupakan asap rokok yang masuk dalam sistem pernafasan (Baker, 2006).

Sebatang rokok terdiri atas campuran tembakau yang digulung oleh kertas. Kebanyakan rokok telah diberi filter pada pangkal hisap. Aditiv tambahan kadang juga dicampur pada tembakau, seperti gula,

coklat, ekstrak buah dan zat beraroma untuk memberikan rasa, bau, dan aroma tertentu pada rokok. Tembakau, kertas, tipe filter dan jenis ventilasi akan menentukan komposisi kimia dari asap rokok. Saat merokok, campuran kompleks akan masuk pada sistem pernafasan (Baker, 2006).

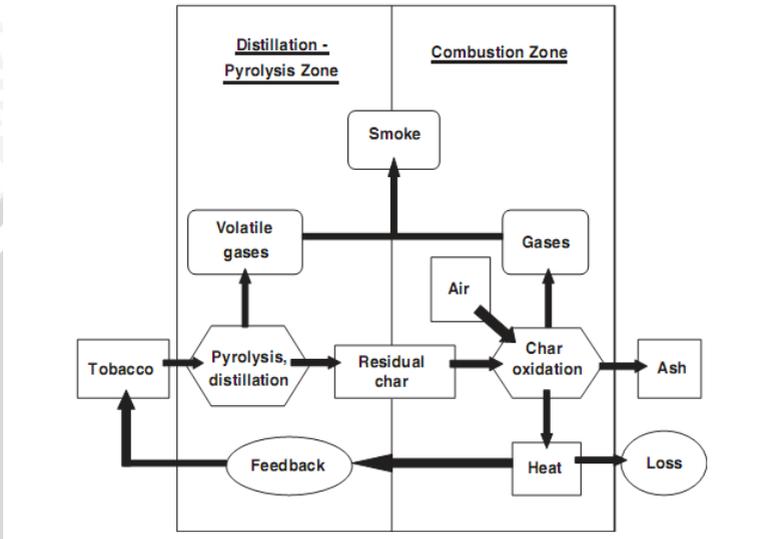


Gambar 2.1. Sebatang rokok saat dibakar (Baker, 2006)

### 2.1.1. Mekanisme Terbentuknya Asap

Mekanisme terjadinya asap dari pembakaran rokok ada tiga yakni pyrolysis dan pembakaran, pembentukan aerosol dan proses transfer massa fisis dan fibrasi. Pyrolysis merupakan dekomposisi termokimia pada material organik pada temperature tinggi tanpa melibatkan adanya oksigen. Pyrolysis merupakan perubahan mendadak pada susunan kimia dan fase fisis, dan hanya proses tersebut tidak dapat dibalik (irreversible). Terdapat dua zona pada daerah pembakaran, yakni zona pembakaran dan zona pyrollisis/destilasi. Pada zona pembakaran, oksigen akan bereaksi dengan tembakau terkarbonisasi yang pada akhirnya akan menghasilkan gas-gas sederhana seperti CO, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>. Suhu pada zona pembakaran akan mencapai 950 °C. Pada zona

pirolisis terdapat sekitar 5000 senyawa kimia yang dihasilkan (Baker, 2006).



**Gambar 2.2. Diagram proses saat rokok dibakar (Baker, 2006)**

Asap rokok merupakan partikel aerosol yang dihasilkan oleh kondensasi uap super jenuh yang mendingin dengan cepat. Pada tembakau sendiri terdapat sekitar 3800 penyusun yang terdiri dari molekul organik, inorganik, dan biopolymer. Molekul-molekul kecil tersebut antara lain adalah hidrokarbon, terpena, alkohol, fenol, asam-asaman, aldehyd, keton, quinon, ester, nitril, senyawa belerang, karbohidrat, asam amino, alkaloid, sterol, isoprenoid, senyawa amadori dan seterusnya. Kelompok biopolymer antara lain selulosa, hemiselulosa, pectin, lignin, protein dan peptide, dan asam nuklei. Pada saat proses merokok, semua molekul tersebut akan terbakar pada suhu yang mencapai  $950^{\circ}\text{C}$  dengan konsentrasi oksigen yang berubah-ubah. Sekitar 4800 zat telah teridentifikasi pada asap tembakau (Baker, 2006).

### 2.1.2. Tinjauan Asap Mainstream Rokok

Asap *mainstream* rokok merupakan asap yang keluar dari pangkal batang sebuah rokok. Asap *sidestream* rokok merupakan asap rokok yang berasal dari ujung sebuah batang rokok. Asap rokok sidestream dan asap rokok mainstream yang keluar dari pernafasan seorang perokok akan berdifusi di udara, didilusi oleh udara sekitar, menjadi asap tembakau lingkungan (ETS). Asap mainstream merupakan penyusun partikel ETS yang berkisar antara 15% hingga 43. Sisanya berasal dari asap sidestream (Baker and Proctor, 1990; Eatough et al., 1990; Guerin, 1991; Guerin and Jenkins, 1992; Guerin et al., 1992).

Asap tembakau merupakan aerosol yang terdiri atas partikel padatan/cairan dalam fase gas. Partikel aerosol tersebut dihasilkan oleh proses yang kompleks dan saling tumpang tindih, diantaranya adalah pyrolysis, pyrosynthesis, distilasi, sublimasi, dan kondensasi. Pada saat sebatang rokok terbakar, suhu pada bara api dapat mencapai 800 °C. Proses konsumsi energi, endothermik, seperti destilasi dan sublimasi yang terjadi hanya beberapa milimeter dibelakang bara api, merupakan penyebab terjadinya penurunan suhu yang ekstrim dimana suhu asap rokok akan turun hingga sama dengan suhu lingkungan. Penyusun asap yang dihasilkan oleh proses pyrolysis dan pyrosynthesis merupakan proses yang tercakup dalam destilasi dan sublimasi (Borgerding and Klus, 2005).

### 2.1.3. Sifat Fisis Pada Asap Rokok

Uap konsentrasi tinggi, super jenuh, dihasilkan pada daerah pyrolysis (distilasi) endothermik pada zona pembakaran. Karena uap keluar dari zona pembakaran, maka ia menjadi dingin hingga suhu udara lingkungan hanya dalam beberapa milidetik. Proses ini akan mengakibatkan uap yang tidak mudah terurai akan mencapai titik jenuhnya dan berkondensasi yang pada akhirnya akan terbentuk aerosol yang berupa titik-titik cairan (partikel) tersuspensiasi pada fase gas (Borgerding, 2005).

Satu kubik centimeter asap rokok mainstream mengandung sekitar  $4 \times 10^9$  partikel bulat yang memiliki diameter sekitar  $0.2 \mu\text{m}$ . Tingginya konsentrasi dari asap rokok mainstream menyebabkan efek koagulasi yang cepat pada usia asap. Saat jumlah partikel menurun, maka akan terjadi kenaikan pada diameter partikel (Borgerding, 2005).

Selain karena efek koagulasi, ukuran dari partikel asap juga akan meningkat pada lingkungan yang lembab. Koagulasi terjadi karena air di lingkungan diserap oleh partikel tersebut. Kelembaban relatif dari asap mainstream adalah 60-70%. Pada tingkat kelembaban seperti itu, sangat sedikit partikel yang diameternya bertambah. Saat kelembaban berada di atas level 90%, partikel akan meningkat dengan pesat. Ukuran partikel akan menjadi dobel saat kelembaban relatif berada pada level 99.5%. Pertumbuhan partikel asap dengan cara menyerap air merupakan proses yang kompleks dan sangat cepat. Proses tersebut akan berlangsung hanya dalam hitungan milidetik, tergantung fase gas lingkungan dan komposisi dari partikel (Baker, 2005).

#### ***2.1.4.1 Ventilasi batang rokok***

Total penyusun dari asap rokok dipengaruhi oleh tingkah laku merokok, campuran tembakau dan bermacam-macam parameter desain rokok. Oleh karena itu, ventilasi filter akan mendilusi asap dengan menyediakan zona lubang mikroskopik disekitar lingkaran filter merupakan sebuah cara untuk mengurangi tingkat 'tar' dan penyusun asap lainnya (Adam, 2009).

Asap rokok merupakan matrix yang dinamis dan sangat kompleks. Sekitar 400-500 spesies hadir pada fase gas; sekitar 300 spesies tersebut diklasifikasikan sebagai spesies yang mudah menguap. Kebanyakan penyusun asap rokok tersebut berada pada level atas; beberapa sangat reaktif, yang berujung pada campuran yang berubah terus-menerus (Adam, 2009).

Tipe tembakau dan campurannya memiliki pengaruh yang besar terhadap komposisi kimia dan tingkat penyusun asap. Selain itu, parameter desain rokok seperti dimensi dan tipe filter, kertas rokok, dan

sistem ventilasi juga memiliki peran yang signifikan. Ventilasi didefinisikan sebagai udara yang masuk pada semua titik dari batang rokok selain dari pembakaran. Ventilasi filter didefinisikan sebagai jumlah udara yang masuk kedalam sebatang rokok melalui kertas pada pangkat rokok. Ventilasi kertas adalah air yang masuk melalui seluruh batang sebuah rokok. Ventilasi biasanya diekspresikan sebagai tingkat ventilasi (dalam persen), yakni perbandingan antara ventilasi aliran udara dengan total aliran yang keluar dari pangkal rokok (Adam, 2009).

#### **2.1.4. Sifat Kimia Dari Asap Rokok**

Asap tembakau terdiri dari bermacam-macam senyawa hidrokarbon. Tipe dari senyawa tersebut bergantung pada suhu saat p tembakau. Saat suhu antara 300 hingga 550 °C pada zona pembakaran, molekul hidrokarbon kecil akan dihasilkan. Rantai n-alkena dan alkena akan terbentuk pada suhu antara 400 hingga 700 °C. Pada suhu diatas 500 °C, benzene dan alkilbenzena terbentuk, sedangkan diatas 700 °C naftalena yang terbentuk. Lebih dari 75 hidrokarbon aromatic monosiklik seperti benzene dan toluene akan dihasilkan dari mekanisme pirolisis asam amino, asam lemak, asam cinnami, gula dan paraffin, beserta cincin aromatic atau sikloheksana, dan pirosintesis dari radikal hidrokarbon utama. Hidrokarbon aromatic polinuklir akan terbentuk pada suhu diatas 800 °C. Lebih dari 300 hidrokarbon aromatic polinuklir telah teridentifikasi. Hidrokarbon aromatic polinuklir terbentuk dari reaksi pirolisis dan pirosintesis hidrokarbon rantai panjang, terpena, fitosterol seperti stigmasterol, paraffin, gula, asam amino, selulosa dan banyak komponen tembakau lainnya. Hidrokarbon aromatic polinuklir juga terbentuk melalui reaksi pirosintesis yang melibatkan radikal bebas hidrokarbon pada suhu tinggi di zona pembakaran (Baker, 2006).

Asap rokok yang berasal dari mariyuana dan tembakau hampir sama, perbedaannya hanya terletak pada cannabionids yang ditemukan pada mariyuana dan nikotin yang ditemukan pada tembakau. Berbagai

senyawa mutagen dan carcinogen ditemukan pada keduanya (Hiller, 1984).

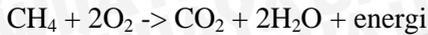
Senyawa-senyawa kimia yang dihasilkan oleh tembakau antara lain adalah pyridine alkaloid seperti nikotin, amonia, acrolein, fenol, acetaldehid, N-nitrosamin; PAH seperti benzopirin; gas pembakaran seperti carbon monoksida, nitroden oksida, hidrogen sianida; logam golongan transisi, unsur radioaktif pemancar alfa seperti polonium, radium dan thorium (Borgerding, 2005).

### **2.1.5. Biomassa Pada Rokok**

Biomasa sebagai sumber energi terbarukan merupakan material biologis dari organisme kehidupan. Sebagai sumber energi, biomasa dapat digunakan secara langsung ataupun diubah menjadi bentuk energi lain seperti biofuel (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>, diakses: 20 Mei 2012).

Menggunakan biomasa sebagai bahan bakar dapat menyebabkan polusi udara dalam bentuk carbon monoksida, NO<sub>x</sub> (nitrogen oksida), VOC (*volatile organic compounds*), particulates dan polutan lainnya. Pada beberapa kasus, level polusi tersebut melebihi polusi dari bahan bakar tradisional seperti batu bara dan gas alam. *Black carbon* (polusi yang dihasilkan akibat pembakaran tidak sempurna dari bahan bakar fosil, bahan bakar bio, dan biomasa) merupakan penyumbang terbesar kedua terhadap global warming (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>, diakses: 20 Mei 2012)..

Pembakaran merupakan sederetan reaksi kimia eksotermik antara bahan bakar dan oksidant yang disertai munculnya panas dan konversi dari zat kimia. Pelepasan panas dapat mengakibatkan timbulnya cahaya dalam bentuk api. Dalam pembakaran sempurna, bahan bereaksi terhadap elemen yang mengoksidasi seperti oksigen atau flourine, dan hasilnya adalah senyawa-senyawa dari tiap elemen pada bahan bakar yang disertai element oksidasi (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>, diakses: 20 Mei 2012).



atau pada pembakaran hidrogen dan oksigen pada mesin roket:



Pembakaran sempurna hampir mustahil dicapai. Pada realitasnya, saat reaksi pembakaran hampir mencapai kesetimbangan, banyak zat-zat yang hadir seperti karbon monoksida dan karbon murni (abu atau arang). Selain itu, semua pembakaran yang terjadi di udara atmosfer, dimana 78% merupakan nitrogen, maka akan dihasilkan beberapa nitrogen oksida (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>, diakses: 20 Mei 2012).

Pada pembakaran sempurna, reaktan akan terbakar oleh oksigen, menghasilkan zat-zat tertentu saja. Saat hidrokarbon terbakar oleh oksigen, reaksi tersebut hanya akan menghasilkan karbon dioksida dan air. Saat sebuah unsur terbakar, maka hasil akhirnya akan menghasilkan oksida, seperti karbon akan menghasilkan karbon dioksida, nitrogen akan menghasilkan nitrogen dioksida, sulfur akan menghasilkan sulfur dioksida, dan besi akan menghasilkan besi(III) oksida (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>, diakses: 20 Mei 2012).

Pembakaran tidak sempurna hanya akan terjadi jika tidak terdapat cukup oksigen yang akan bereaksi dengan bahan bakar untuk menghasilkan carbon dioksida dan air. Pembakaran tidak sempurna juga terjadi jika pembakaran tersebut dipadamkan (<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>, diakses: 20 Mei 2012).

Untuk kebanyakan bahan bakar, seperti solar, batu bara dan kayu, pirolisis terjadi sebelum adanya proses pembakaran. Pada pembakaran yang tidak sempurna, hasil dari pirolisis akan tetap tidak terbakar dan mengkontaminasi asap dengan particulate matter dan gas yang berbahaya. Senyawa yang teroksidasi sebagian juga mengandung bahaya, oksidasi parsial dari ethanol dapat menghasilkan acetaldehyde berbahaya, dan karbon dapat menghasilkan karbon monoksida yang beracun (<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis>, diakses: 20 Mei 2012).

Pirolisis merupakan penguraian termokimia dari material organik pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen. Pirolisis meliputi perubahan simultan komposisi kimia dan fase fisis, dan irreversibel. Pirolisis pada kayu terjadi pada suhu 200-300 °C. Pada umumnya, pirolisis dari zat organik akan menghasilkan zat dalam bentuk gas dan cairan serta residu padatan yang kaya akan karbon (<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis>, diakses: 20 Mei 2012).

## 2.2. Emisi Pada Asap Rokok

Emisi yang dihasilkan oleh asap rokok antara lain adalah *Particulate Matter* atau *PM* (*ultrafine particles UFP*, <100 nm), *carcinogenic polyaromatic hydrocarbon (PAH)*, karbon monoksida (CO), senyawa serupa Dioksin, senyawa *N-base*, senyawa *S-base*, *volatile organic compounds (VOC)*, dan radikal bebas.

Terdapat dua fase utama pembentukan asap rokok: fase tar (partikel) dan fase gas. Kedua fase tersebut terdiri dari banyak radikal bebas yang mengikat oksigen, karbon dan nitrogen maupun oksidan bukan radikal. Berdasarkan analisis pada tiap fase, diperkirakan bahwa dari setiap batang rokok yang dibakar mengandung sekitar  $10^{14}$  radikal bebas pada fase tar dan  $10^{15}$  radikal bebas pada fase gas. Berbagai macam senyawa ini dapat menyebabkan peningkatan pada penciptaan berbagai macam *ROS (Reactive Oxygen Species)* seperti radikal superoksida, hidrogen peroksida, hidroksil dan peroksil. *ROS* ini pada akhirnya dapat menyebabkan kerusakan oksidasi dalam bentuk peroksidasi lipid ([http://en.wikipedia.org/wiki/Tobacco\\_smoking](http://en.wikipedia.org/wiki/Tobacco_smoking), diakses: 20 Mei 2012).

### 2.2.1. Tar Dan Filter

Asap rokok mainstream terdiri lebih dari 4700 penyusun yang berada pada kondisi dinamis dan secara kimia merupakan aerosol yang kompleks dan dapat dikategorikan baik dalam fase gas maupun fase partikel yang mengendap. Fase gas dari rokok tanpa filter terdiri dari

hampir 500 campuran yang mudah menguap, termasuk karbon monoksida, nitrogen oksida, dan amonia serta 95% berat asap rokok mainstream. Fase partikel mengandung lebih dari 3500 senyawa semivolatilis dan nonvolatilis, termasuk nikotin, polynuklir aromatik hidrokarbon (PAH). Komposisi dari fase gas dan partikel bermacam-macam sesuai dengan desain rokok.

Asap rokok mainstream biasanya dianalisis kadar dan penyusunnya. Pengukuran kadar meliputi penentuan 'tar', nikotin, dan karbon monoksida yang dihasilkan dibawah kondisi standar yang didefinisikan oleh badan standar nasional dan internasional. Sesuai dengan standar ISO, 'tar' dari asap rokok mainstream merupakan campuran kompleks kimia yang didefinisikan sebagai Total Particulate Matter (TPM) pada asap dikurangi berat dari nikotin dan air. Kategori tar ada tiga tingkat: Low Yield (LY), Medium Yield (MY), dan High Yield (HY) dimana masing-masing dari kategori tersebut memberikan nilai 1.0-5.5 mg, 9.6-12.2 mg, dan 14.5-16.8 mg per batang rokok. Parameter yang menentukan kadar tar tersebut antara lain adalah tipe tembakau, berat tembakau, komposisi filter, ventilasi filter, dimensi struktur, dan kertas (Slezakova, 2009).

Seorang perokok akan merokok karena dia sudah memiliki kecanduan terhadap nikotin. Selain nikotin, asap rokok juga mengandung bermacam-macam senyawa yang beracun dan agen karsinogen seperti tar. Tar terdiri dari senyawa PAH dan merupakan resiko utama kesehatan. Kebanyakan filter rokok terbuat dari serat CDA (Cellulose Diacetate). Namun CDA yang biasa digunakan tidak terlalu efektif untuk menyingkirkan senyawa beracun dari asap mainstream rokok. Untuk meningkatkan efisiensi penyingkiran, beberapa aditif ditambahkan seperti karbon aktif, zeolite, atau bahkan karbon nanotube, dimana aditif tersebut akan mampu menyerap dan mengurai zat-zat beracun dari asap mainstream (Tian, 2007).

Filter rokok pertama kali dibuat pada tahun 1950-an. Pada umumnya filter dibuat dari mono-filament selulosa asetat dan dapat mengurangi kadar tar dan nikotin hingga 40-50% dibanding rokok yang

tidak menggunakan filter. Berbagai bahan tambahan dan perlakuan kimia telah diajukan untuk memfilter asap rokok. Namun, filter dua lapis, yang terdiri dari karbon pada lapis kedua, merupakan filter yang paling umum digunakan. Filter yang mengandung karbon lebih efisien dibanding filter yang mengandung cellulose acetate (CA) - filter untuk menyingkirkan senyawa-senyawa dengan titik didih rendah. Aldehid yang memiliki berat molekul rendah (formaldehid, acetaldehid, acrolein dan acetone) yang tidak terpengaruh oleh filter CA dapat dikurangi dengan menggunakan filter karbon. Tingkat aktivitas biologis dan juga komposisi kimia dari asap rokok merupakan faktor yang penting dalam karakterisasi sifat filter (Tian, 2007).

### **2.2.2. Polycyclic Aromatic Hidrocarbon (PAH)**

PAH merupakan senyawa organik dengan dua atau lebih cincin aromatik terdifusi. PAH berasal dari berbagai sumber alam dan antropogenik. Senyawa tersebut dihasilkan selama pembakaran tidak sempurna dari zat organik seperti batu bara, minyak dan gas. Perhatian terhadap kesehatan dari PAH difokuskan pada potensi keracunannya, mutagennya dan karsinogennya pada manusia. PAH merupakan senyawa genotoxic dan sifat karsinogennya diperantarai oleh kemampuannya untuk merusak DNA ([http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic\\_aromatic\\_hydrocarbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic_aromatic_hydrocarbon), diakses: 20 Mei 2012).

Hingga saat ini, 549 senyawa PAH telah diidentifikasi pada asap tembakau, 12 diantaranya dikelompokkan sebagai karsinogen. Selama pembakaran tembakau, PAH terdistribusi antara fase gas dan fase partikel, selanjutnya disusun oleh partikel dari berbagai ukuran ([http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic\\_aromatic\\_hydrocarbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic_aromatic_hydrocarbon), diakses: 20 Mei 2012).

### **2.2.3. Volatile Organic Compounds (VOC)**

VOC merupakan senyawa kimia organik yang memiliki tekanan uap tinggi pada suhu kamar dan mudah menguap akibat titik didih yang rendah. Akibat penguapan tersebut, pada akhirnya senyawa ini akan tercampur dengan zat-zat yang terdapat pada lingkungan. Salah satu contoh dari VOC adalah Formaldehide. Formaldehide merupakan senyawa kimia organik yang memiliki rumus kimia  $\text{CH}_2\text{O}$ . Menurut program the US National Toxicity Program, Formaldehide merupakan salah satu senyawa yang bersifat karsinogen (National Toxicology Program, 2011).

### **2.2.4. Particulate Matter (PM)**

Partikel ultrafine dan nanopartikel memiliki sifat khusus aerodinamis dan biokimia yang mempengaruhi sistem kekebalan tubuh dan kesehatan manusia yang berbeda dari partikel gas atau yang lebih besar. Efek ini berasal dari sifat khusus yang memiliki kemampuan untuk masuk kedalam jaringan dan sel, yang berinteraksi dengan protein dan DNA pada level molekular dan secara langsung maupun tidak langsung mengubah sistem kekebalan tubuh (<http://en.wikipedia.org/wiki/Particulates>, diakses: 20 Mei 2012).

Zat partikel dikategorikan berdasarkan ukurannya.  $\text{PM}_{10}$  merupakan partikel yang memiliki diameter kurang dari 10  $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  adalah partikel yang memiliki diameter aerodinamik kurang dari 2.5  $\mu\text{m}$  dan UFP dan nanopartikel didefinisikan sebagai partikel yang memiliki diameter kurang dari 100nm (Slezakova, 2009).

Nanopartikel dan ultrafine partikel memiliki diameter yang sama. Perbedaan antara keduanya terletak dari mana keduanya berasal. Ultrafine partikel merupakan partikel yang dihasilkan sebagai emisi "spurious" yang berasal dari kehidupan sehari-hari atau industri, dan diklasifikasikan sebagai polusi udara. Namun, nanopartikel merupakan partikel yang berasal dari hasil rekayasa atau manufaktur (Slezakova, 2009).

### 2.2.5. Radikal Bebas

Radikal bebas merupakan senyawa yang tidak stabil akibat kekurangan elektron atau kelebihan elektron. Senyawa  $O_2$  merupakan senyawa stabil. Senyawa  $O_2^-$  merupakan radikal bebas. Senyawa stabil dapat berubah menjadi radikal bebas disebabkan proses pembakaran. Pembakaran pada rokok merupakan salah satu peristiwa yang menyebabkan munculnya radikal bebas tersebut. Pada penelitian ini, akan diamati bagaimana hubungan antara kecepatan hisap dengan emisi radikal bebas yang dihasilkannya.

Pembakaran merupakan sumber utama zat partikel yang menentukan kualitas udara seperti asap tembakau, emisi kendaraan. *Reactive Oxygen Species (ROS)* merupakan istilah yang mengacu pada radikal bebas seperti hidroksil ( $HO^\cdot$ ) dan peroksil ( $HOO^\cdot$ ,  $ROO^\cdot$ ), ion-ion seperti superoksida ( $O_2^-$ ) dan peroksinitrat ( $ONOO^-$ ) dan molekul-molekul seperti hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) dan hidroperoksida ( $ROOH$ ) ([http://en.wikipedia.org/wiki/Tobacco\\_smoking](http://en.wikipedia.org/wiki/Tobacco_smoking), diakses: 20 Mei 2012).

### 2.2.6. Senyawa Serupa Dioxin

Dioksin dan Furan merupakan senyawa kimia yang paling beracun. Menurut laporan yang dikeluarkan oleh US Environmental Protection Agency pada September 1994, dioksin merupakan ancaman serius terhadap kesehatan public. Senyawa dioksin sama berbahayanya dengan DDT (*dichlorodiphenyl trichloroethane*) yang dikenal sebagai bahan insektisida. Jenis senyawa serupa dioksin yang paling beracun adalah 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD). Dioksin muncul akibat adanya unsur Klorin (<http://chej.org/wp-content/uploads/Documents/Dioxin%20Fact%20Sheet.pdf>, diakses: 20 Mei 2012).

### 2.2.7. Nitrosamine

Karsinogen didefinisikan sebagai agen yang menyebabkan perubahan genetik, yang pada akhirnya akan mengarah pada

pembentukan kanker. Asap tembakau telah lama diakui sebagai karcinogen kimia. Beberapa senyawa kimia yang menyebabkan kanker antara lain nitrosami tembakau tertentu, N-Nitrosomorpholin, n-Nitrosornicotin (NNN), 4-(Methylnitrosamino)-1-(3-pyridyl)-1-butanone (NNK), N-Nitrosoanatabine (NA) dan n-Nitrosoanabasine (NAB), yang berasal dari penyusun alami tanaman tembakau (Borgerding, 2005).

### **2.3. Efek Kesehatan**

Merokok masih merupakan penyebab utama penyakit yang dapat dicegah. Asap rokok bisa mengakibatkan kanker, penyakit jantung dan paru-paru, dan ketagihan. Logam beracun tersebut berasal dari tanah dimana tembakau tersebut ditanam. Penyakit yang berhubungan dengan tembakau berasal akibat konsekuensi biologis dari paparan asap rokok berulang-ulang yang mengandung zat beracun dari proses pyrosynthesis saat pembakaran. Asap tembakau mengandung sifat racun, genotoxic, mutagenic, dan karsinogenik. Terdapat lima kelas carcinogens pada asap tembakau, yaitu nitrosamine, polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), logam beracun, senyawa serupa dioksin, dan metalloid. Cadmium dan timah terdapat pada asap tembakau dan merupakan penyebab utama resiko kanker. Selain itu, kadmium juga dapat menyebabkan penyakit selain kanker, yakni penyakit yang berhubungan dengan pernafasan dan jantung. Monovalent thalium dikenal berkaitan dengan neurotoxicity (Pappas, 2006).

Kandungan kadmium, thalium dan timah dalam partikel asap rokok mainstream dapat ditentukan dengan pasangan spektrometer plasma-mass. Merokok sering dihubungkan dengan penyakit kanker dari bermacam sistem organ, penyakit paru-paru, dan penyakit jantung. Penyakit-penyakit ini berasal dari efek biologis akibat hirupan campuran zat kimia yang dihasilkan oleh pyrosynthesis, perpindahan langsung atau distilasi dari zat-zat kimia tembakau. Beberapa kelas kimia yang ditemukan pada tembakau antara lain, yaitu nitrosamin, polyaromatic hidrokarbon, dan logam berat. Logam-logam berat tersebut dapat

dengan mudah diambil dari tanah oleh tanaman tembakau. Oleh karena itu, tingkat kandungan logam berat pada tembakau akan lebih besar jika tembakau tersebut ditanam pada lingkungan yang memiliki tingkat kandungan logam berat tinggi. Selain itu, faktor yang mempengaruhi tinggi rendahnya kandungan logam berat pada tembakau juga ditentukan oleh pH tanah (Pappas, 2006).

Saat merokok, logam berat berada pada asap mainstream, asap sidestream, abu dan pangkal batang rokok. Asap rokok mainstream biasanya dibagi menjadi dua jenis fase: particulate fase (kondensasi) yang terkumpul pada batang filter dan fase gas atau uap yang melewati batang filter tersebut. Pada asap mainstream, tingkat kadar kadmium dan timah berubah-ubah pada kedua fase. Pada sebagian penelitian, disebutkan bahwa thalium umumnya ditemukan saat particulate fase (Pappas, 2006).

Saat seorang perokok menghirup asap, logam berat akan masuk melalui mulut menuju paru-paru. Dari paru-paru, logam berat tersebut akan menuju organ lain bersama zat lain, seperti nikotin. Kadar kadmium yang tinggi pada paru-paru, liver, jaringan ginjal, lemak tubuh, darah, urine dan cairan ketuban berhubungan dengan riwayat merokok seseorang (baik perokok primer maupun pasif). Kadar timah yang tinggi pada dalam dan cairan ketuban serta pembuluh darah pada bayi berhubungan dengan riwayat merokok (Pappas, 2006).

*Cigarette smoke condensate (CSC)* dan *total particulate matter (TPM)* pada asap rokok merupakan zat beracun dan mungkin mengakibatkan beberapa efek patologis. CSC merupakan asap tembakau yang tidak mengandung nikotin dan air. Senyawa-senyawa kimia dari asap rokok antara lain adalah radikal bebas, gas-gas berbahaya, volatile organic compounds (VOC), aldehydes, PAH, dan tobacco-specific nitrosamines (TSNA) (Pappas, 2005).

Merokok dapat mengurangi usia hingga 7 tahun dan dapat memperpendek usia hidup akibat penyakit hingga 14 tahun (WHO, 2004). Mekanisme pasti dimana merokok menyebabkan penyakit dan kematian pada umumnya tidak banyak dipahami, namun bukti selalu

menerangkan bahwa merokok dapat melumpuhkan fungsi pertahanan dan perbaikan sel, yang berakhir pada terakumulasinya kerusakan seperti mutasi dan tidak berfungsinya sel (Bernhard, 2004).

Penyakit yang paling serius yang berkaitan erat dengan meningkatnya kematian akibat rokok antara lain adalah osteoporosis, kanker, penurunan kemampuan penglihatan, dan kardiovaskular. Pada proses penuaan yang normal, latar belakang genetika pribadi menentukan organ mana yang sensitif terhadap kerusakan sehingga ia berakibat mudahnya terserang penyakit.

Asap rokok terdiri lebih dari 4000 macam penyusun kimia, dimana kebanyakan penyusun tersebut dihasilkan saat pembakaran sebatang rokok. Zat tersebut lalu terhirup oleh perokok. Akibatnya, organ pertama yang dimasuki oleh agen berbahaya adalah mulut dan lubang hidung dan selanjutnya adalah sistem pernafasan bagian atas dan paru-paru. Senyawa hidrophobic (tar dari asap rokok) yang mengendap dalam mulut akan tertelan dan akhirnya akan masuk dalam sistem pencernaan. Senyawa-senyawa kimia yang terhirup selanjutnya akan difilter dengan pengendapan pada permukaan sistem pernapasan atas. Oleh karena agen hydrophobic, seperti PAH dapat berdifusi melalui membran sel dan lapisan sel, pengendapan yang mengandung senyawa kimia dapat menembus lapisan mukosa (penyerapan dan sekresi) dan mencapai sirkulasi sistem tubuh, yang mana pada akibatnya senyawa-senyawa kimia tersebut juga akan mencapai kulit (Bernhard, 2006).

Setelah memasuki sistem sirkulasi tubuh, senyawa-senyawa kimia (hydrophilic dan hydrophobic) tersebut akan masuk dalam sistem transport biokimia (albumin) dan sel (erythrocytes), atau larut dalam serum. Banyak dari senyawa-senyawa ini akan masuk organ, bertempat disana, dan menyebabkan kerusakan. Misalnya, Asap rokok yang mengandung kadmium akan mengendap pada vascularute (intima dan media) dan pada renal tubules. Proses ini terjadi secara fisiologis bersama penuaan karena Cd merupakan penyusun nutrien yang normal. Namun, asap tembakau - dimana ia merupakan sumber utama Cd -

mempercepat proses penuaan yang mengarah pada atherosclerosis dan menurunkan fungsi ginjal. Zat-zat kimia yang terdapat pada rokok juga akan mempengaruhi system penawar racun seperti enzim cytochrome. Pada PAH, sistem penawar racun mungkin mengubah senyawa-senyawa ini menjadi agen yang mutagen dan berbahaya.

Perubahan yang diakibatkan oleh radikal bebas dan oksidan dari protein, asam nukleat, lipid, gula, dan sel menyebabkan timbulnya penyakit yang berhubungan dengan penuaan hingga begitu luas. Analisis asap rokok mengungkapkan bahwa tar mengandung lebih dari  $10^{17}$  radikal bebas yang berumur panjang per gramnya, dan senyawa-senyawa yang mudah menguap mengandung lebih dari  $10^{15}$  radikal bebas umur pendek per gramnya.

Tubuh memiliki beberapa langkah dalam menanggulangi perubahan pada keadaan fisiologis yang terjadi hubungannya dengan penuaan. Asap rokok bersinggungan dengan mekanisme kekebalan tubuh dengan dua cara. Pertama, zat-zat kimia dari asap rokok meningkatkan jumlah perbaikan yang diperlukan dari sistem pertahanan dengan meningkatkan kerusakan. Kedua, asap kimia mengganggu mekanisme pertahanan itu sendiri, dan mengurangi efisiensinya. Misalnya, konsentrasi berbagai faktor seperti serum selenium dan seng, yang memainkan peran penting pada pertahanan oksidan, dihambat akibat merokok.

## **2.4. Metode Deteksi Partikel Asap Rokok**

Radikal bebas disebabkan oleh asap mainstream pada rokok. Metode untuk mendeteksi dan melakukan kuantifikasi dari radikal bebas tersebut yaitu dengan menggunakan electron spin resonance (ESR) spectrometer dengan metodologi "spin trapping" baik pada saat fase gas maupun fase partikel. Aerosol asap terbagi dalam dua fase, yakni particulate fase dan fase gas. Asap rokok bisa mengandung radikal bebas dalam konsentrasi tinggi ( $10^6$  spins). Radikal bebas ini hadir dalam waktu yang singkat dan dianggap menyebabkan carcinogenesis dan mutagenesis. Pada fase gas, diketahui adanya radikal alkoxyl ( $RO^*$ )

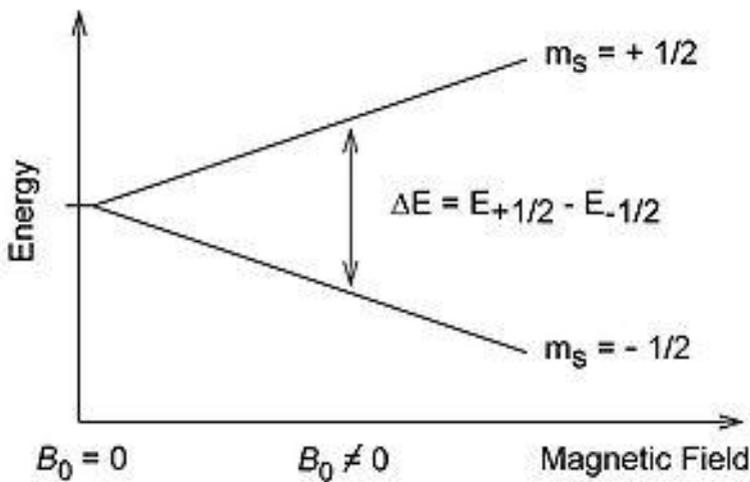
dan carbon-centred alkyl serta nitric oxide. ESR merupakan metode yang paling sensitive dan langsung untuk mengetahui keberadaan dari radikal bebas yang hidup lebih lama (stabil) (Baum, 2002).

Banyak metode yang bisa digunakan untuk mengidentifikasi logam berat yang terkandung dalam asap rokok, diantaranya Graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS), Instrumental neutron activation analysis (INAA), Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), quadrupole inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS).

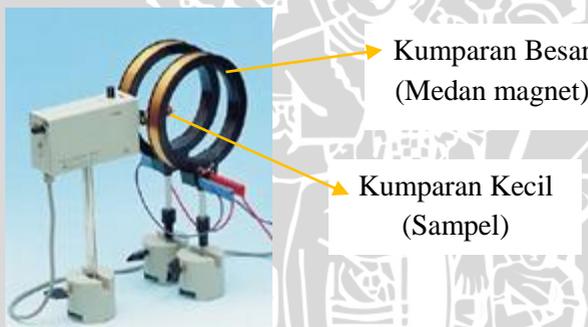
#### **2.4.1. Electron Spin Resonance**

Electron spin resonance (ESR) spektroskopi merupakan teknik untuk mempelajari zat kimia yang memiliki satu atau lebih elektron yang tidak berpasangan, seperti radikal bebas organik maupun radikal bebas anorganik. Dalam fisika dan kimia, spektroskopi ESR digunakan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan radikal bebas. Konsep fisis dasar dari ESR sama dengan nuclear magnetic resonance (NMR). Perbedaannya terletak pada spin elektron yang tereksitasi untuk ESR, sedangkan NMR pada spin dari inti atom.

Setiap elektron memiliki sebuah momen magnetik dan bilangan kuantum spin  $s = 1/2$ , dengan komponen magnetik  $m_s = +1/2$  dan  $m_s = -1/2$ . Jika terdapat medan magnetik external dengan kekuatan  $B_0$ , maka momen magnetik elektron akan menyejajarkan diri secara paralel ( $m_s = -1/2$ ) atau antiparalel ( $m_s = +1/2$ ) terhadap medan. Tiap penyejajaran memiliki sebuah energi tertentu. Kesejajaran paralel berkaitan dengan tingkatan energi rendah (lower energy state) dan selisihnya terhadap tingkat energi atas sebesar  $\Delta E = g_e \mu_B B_0$ , dimana  $g$  merupakan g-faktor dari elektron dan  $\mu_B$  merupakan Bohr magneton. Persamaan ini menunjukkan bahwa perbedaan level energi proporsional terhadap kekuatan medan magnetik, seperti terlihat pada diagram dibawah.



Gambar 2.3. Hubungan antara medan magnet dan energi



Gambar 2.4. Konfigurasi kumparan besar dan kumparan kecil

Gambar 2.3. dan gambar 2.4. menjelaskan bahwa sumbu horizontal merupakan representasi besarnya medan magnet dari kumparan besar, yakni medan magnet yang mengarah masuk kedalam kumparan tersebut. Akibat pengaruh medan magnet ini, spin radikal bebas yang ada pada sampel akan memisah (splitting) sebesar  $\Delta E$ . Pemisahan inilah yang menyebabkan mengapa proses ini disebut sebagai proses resonansi – tergambar oleh  $\Delta E$ . Semakin besar medan magnet yang diberikan maka energi ( $\Delta E$ ) dari radikal bebas tersebut

akan meningkat pula. Hal ini dapat berarti bahwa konsentrasi dari radikal bebas tersebut memiliki nilai yang tinggi.

Sedangkan sumbu vertikal merupakan representasi dari pengaruh medan magnet kecil dimana didalamnya terdapat sampel. Medan magnet ini menentukan besarnya energi yang diserap atau dipancarkan oleh radikal bebas sebesar  $\Delta E$ . Grafik pada gambar 2.3. menggambarkan bahwa medan magnet memiliki hubungan linier terhadap energi (frekuensi resonansi).

Sebuah elektron yang tidak berpasangan dapat berpindah diantara dua level energi dengan menyerap atau memancarkan radiasi elektromagnetik dengan energi sebesar  $E = h\nu$  dimana kondisi resonansi terpenuhi,  $E = \Delta E$ . Melakukan substitusi pada  $E = h\nu$  dan  $\Delta E = g_e \mu_B B_0$  akan menghasilkan persamaan dasar untuk ESR spektroskopi:  $h\nu = g_e \mu_B B_0$ . Secara eksperimen, persamaan ini dapat diterapkan pada kombinasi frekuensi dan nilai medan magnet yang besar, tetapi pengukuran ESR pada umumnya dilakukan dengan gelombang mikro pada daerah 9.000 - 10000 MHz.

Pada prinsipnya, spectrum ESR dapat dihasilkan dengan mengubah-ubah frekuensi foton yang menumbuk pada sampel dengan membuat medan magnet tetap konstan atau sebaliknya. Pada praktiknya, biasanya frekuensi yang dibuat tetap. Kumpulan pusat paramagnetic, seperti radikal bebas, dipaparkan terhadap gelombang mikro pada frekuensi tetap. Dengan meningkatkan medan magnetic eksternal, maka selisih antara  $m_s = +1/2$  dengan  $m_s = -1/2$ , energi state diperlebar hingga sesuai dengan energi dari gelombang mikro, seperti anak panah dobel pada gambar diatas. Pada keadaan seperti ini, elektron-elektron yang tidak berpasangan dapat bergerak bebas diantara dua keadaan spinnya. Karena biasanya disana terdapat lebih banya electron yang berada pada energy rendah, akibat distribusi Maxwell-Boltzman, maka terjadi penyerapan energy, dan penyerapan ini dimonitor serta diubah menjadi spectrum.

Pemahaman terhadap faktor-g dapat memberikan informasi tentang struktur elektronik pusat paramagnetik. Sebuah elektron yang

tidak berpasangan tidak hanya responsive terhadap spectrometer yang memiliki medan magnetic  $B_0$ , tetapi ia juga responsif terhadap medan magnetik lokal dari atom atau molekul.

Electron spin resonance (ESR) merupakan topic dari magnetic resonance. Penyerapan medan energy yang berubah-ubah dari sebuah sampel pada medan magnet sebesar coil Helmholtz diukur menggunakan ESR dan osiloskop pada mode-xy. Dari hubungan antara frekuensi resonansi dan kekuatan medan resonansi  $B$  elektromagnetik, maka dihitunglah factor-g untuk spin electron  $g_s$ .

Sebuah sistem spin electron paramagnetic pada koil dari rangkaian resonansi frekuensi tinggi akan menyerap energy frekuensi tinggi dalam sebuah medan DC selama resonansi. Hal ini akan mengarah pada perubahan yang terukur dalam impedansi rangkaian resonansi.

Metode ESR merupakan salah satu metode untuk menemukan sesuatu tentang momentum angular intrinsic dari electron (spin); torsi magnetik, kemungkinan penyesuaian terkuantisasi dari spin pada medan magnetic luar dan tingkat energi yang terhubung dengannya. Untuk melakukan hal ini, penghubung antara tingkatan energi di induksi pada medan AC frekuensi tinggi, yang bersesuaian dengan dua kemungkinan penyesuaian spin yang stabil di medan magnetik luar.

Senyawa organik *Diphenyl-picryl-hidrazyl (DPPH)* merupakan sebuah radikal bebas, dimana sebuah elektron tidak berpasangan muncul pada satu atom nitrogen

Elektron dari sampel DPPH, yang tidak memiliki momentum sudut orbital apapun ( $l = 0$ ), sangat cocok digunakan sebagai experiment untuk resonansi spin elektron. Sampel diletakkan dalam sebuah medan DC magnetik. Selama resonansi (energi dari photon yang teradiasi sama dengan beda energi antara dua kemungkinan posisi spin yang stabil; perpindahan terinduksi - energi frekuensi tinggi akan diserap, yang mana kemudian akan dipantulkan dalam sebuah perubahan dari impedansi rangkaian resonansi.

Selama pengukuran resonansi spin elektron, akibat alasan-alasan eksperimen, frekuensi dari radiasi gelombang mikro tidak diambi, namun kekuatan medan magnetik luar di ubah-ubah.

Melalui modulasi medan DC magnetik, perubahan pada hambatan selama resonansi dapat di ambil secara periodik sehingga ia dapat ditampilkan pada osiloskop.

Sumbu vertika merupakan gambaran tegangan yang proporsional terhadap amplitudo dari medan frekuensi tinggi. Sumbu horizontal menggambarkan tegangan yang proporsional terhadap medan coil Helmholtz.

Frekuensi resonansi  $f$  merupakan sebuah fungsi dari kuat medan resonansi  $B$ . Nilainya ditentukan secara eksperimen, dimana kemudian dibandingkan dengan hasil teoritis yang didapat dibawah lalu dievaluasi.

#### **2.4.1.1 Elektron Spin Resonance**

Momen magnetik memiliki hubungan dengan spin elektron. Ia dapat dimengerti dengan jelas dengan mempertimbangkan elektron sebagai sebuah muatan elektrik yang berputar dan dengan pemahaman dari fakta bahwa sebuah arus yang berputar memiliki sebuah momen magnetik. Karena muatan negatif dari elektron, momen magnetik berperilaku dalam arah yang berlawanan terhadap spin. Pemahaman yang jelas tentang elektron yang berputar tidak dapat dilihat secara literal, karena tidak ada hasil yang secara kuantitatif benar yang bisa didapat darinya.

Hubungan antara spin elektron  $\vec{s}$  dan momen magnetik  $\vec{\mu}_s$  dari sebuah elektron diekspresikan dalam bentuk:

$$\vec{\mu}_s = \frac{g_s \mu_B}{\hbar} \vec{s} \quad (2.1)$$

$\mu_B$  merupakan Bohr magneton, yang menggambarkan unit struktural untuk momen magnetik atom.  $\hbar$  merupakan unit struktural

untuk momentum sudut atom. Konstanta  $g_s$  merupakan karakteristik nilai untuk elektron, yang digambarkan sebagai faktor-g untuk spin dari elektron.

Konstanta  $g$  menunjukkan rasio nilai momen magnetik terhadap momentum sudut pada unit atom yang bersangkutan:

$$g_s = \frac{\mu_s - \mu_B}{s - \hbar} \quad (2.2)$$

Jika perbandingan antara momen magnetik dan momentum sudut orbital dibentuk, maka secara eksperimen nilai  $g=1$  akan didapat dan untuk Bohr magneton akan didapat nilai  $\mu_B = e \cdot \hbar / (2m_0 \cdot c)$ ;  $m_0$  merupakan masa diam dari elektron. Faktor-g untuk spin dari sebuah elektron tidak dapat dipahami dengan fisika klasik. Ia hanya dapat dimengerti dengan mekanika kuantum relativitas. Ia memiliki nilai  $g_s = 2$  dengan faktor koreksi 0.1%, dimana hal tersebut sesuai dengan eksperimen.

Untuk mendapatkan perumusan resonansi, maka digunakanlah hasil perhitungan secara mekanika kuantum, dimana momentum sudut orbital  $\vec{l}$  dapat dihitung dengan perumusan  $\vec{l} = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ .  $l$  merupakan bilangan kuantum momentum sudut. Demikian juga, komponen-komponen teramati dari momentum sudut dikuantisasi dalam satu arah khusus sesuai dengan perumusan  $l_z = m \cdot \hbar$ .  $m$  yang merupakan bilangan kuantum magnetik. Arah sumbu  $z$  didefinisikan sebagai medan magnetik. Untuk momentum sudut orbital dengan bilangan kuantum orbital  $l$ ,  $m$  harus memiliki nilai bilangan bulat,  $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm l$ . Arah sumbu  $z$  bersesuaian dengan arah dari medan luar.

Vektor momentum sudut  $\vec{s}$  mengikuti aturan yang sama seperti momentum sudut orbital.

$$\vec{s} = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar \quad (2.3)$$

$$s_z = m_s \cdot \hbar ; \quad (2.4)$$

$$m_s = -s, \dots, +s \quad (2.5)$$

Saat memisahkan keadaan basis-S ( $l = 0$ ), kedalam dua komponen (bilangan genap), maka kita dapat menyimpulkan bahwa elektron tersebut memiliki sebuah spin. Dilain pihak, bilangan kuantum spin harus memiliki nilai  $s = \frac{1}{2}$ , sehingga untuk semua nilai yang mungkin dari bilangan kuantum spin magnetik  $m_s$  :

$$2 \cdot s + 1 = 2 . \quad (2.6)$$

Bilangan kuantum spin magnetik hanya dapat memiliki nilai  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ , dimana hal ini bisa menjelaskan proses pemisahan yang menjadi dual level.

Dengan hanya dua kemungkinan yang di pasang, maka momen magnetik dari elektron yang dicoupled dengan momentum sudut intrinsic akan memiliki dua kemungkinana. Komponen-z dari momen magnetik adalah

$$\mu_z = \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B \quad (2.7)$$

Energi potensial  $E_m$  dari momen magnetik  $\vec{\mu}$ , dimana dalam sebuah medan megnetik dengan rapat flux  $\vec{B}$ , adalah:

$$E_m = \vec{\mu} \cdot \vec{B} = \mu_z B \quad (2.8)$$

Penyerapan resonansi mengambil alih ketika energi dari radiasi foton  $E = hf$  sama dengan pemisahan magnetik energi.  $f$  merupakan frekuensi dari foton. Maka akhirnya kita dapatkan perumusan resonansi

$$hf = g_s \mu_B B \quad (2.9)$$

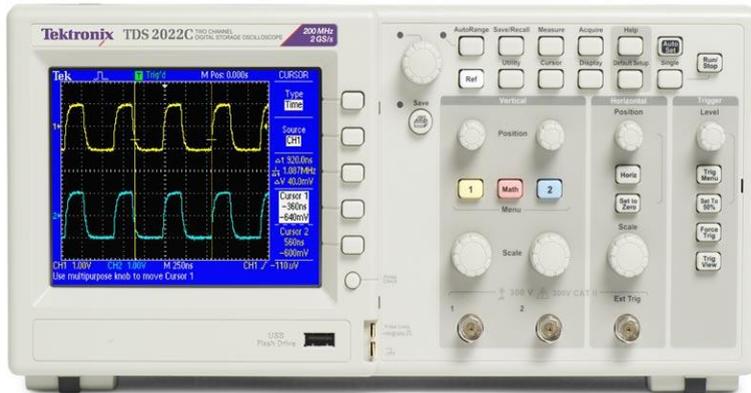
Pada umumnya, kita harus mempertimbangkan fakta bahwa total momentum sudut  $J$  merupakan penjumlahan momentum sudut orbital dengan spin.

### 2.4.2. Osiloskop

Osiloskop merupakan instrument elektronik yang digunakan untuk mengamati sinyal tegangan yang berubah-ubah secara konstan sebagai grafik dua dimensi. Osiloskop biasanya digunakan untuk mengamati bentuk gelombang dari sebuah sinyal listrik. Selain amplitude sinyal, osiloskop dapat juga menunjukkan distorsi, waktu antara dua kejadian (sepertilebar pulsa, periode atau waktu angkat) dan waktu relative antara dua sinyal yang berkaitan.

Pada awalnya, osiloskop menggunakan CRT sebagai penampil dan linier ampliflier untuk pemrosesan sinyal, namun untuk osiloskop modern, penampilnya menggunakan LCD atau LED, pengubah ADC dan DSP (digital signal processor).

Struktur osiloskop dapat dibagi menjadi empat bagian: Penampil, control vertical, control horizontal, dan control trigger. Selain itu, terdapat pula tiga control dasar, yakni tombol focus, tombol intensitas dan tombol *beam finder*. Kontrol vertical mengendalikan amplitude sinyal yang ditampilkan. Kontrol vertical mengendalikan *time base* dari instrument.



**Gambar 3.4. Osiloskop digital Tektronix TDS1001B**

Function generator merupakan sebuah instrument elektronika yang digunakan untuk menghasilkan berbagai jenis bentuk gelombang listrik dengan range frekuensi yang lebar. Bentuk gelombang ini bisa berupa gelombang berulang ataupun gelombang single. Biasanya sebuah function generator menghasilkan bentuk gelombang yang dihasilkan dengan *charging* dan *discharging* yang berulang dari kapasitor dimana sebuah sumber energy konstan dihubungkan. Bentuk gelombang yang dihasilkan sinyal generator pada umumnya adalah sinus, kotak, dan segitiga.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2012 hingga selesai di laboratorium Fisika Lanjutan jurusan Fisika. Tabel dibawah menunjukkan jadwal rencana kegiatan tugas akhir terhitung mulai minggu pertama Maret 2012 hingga selesai.

**Tabel 3.1. Jadwal rencana pengerjaan tugas akhir**

	Minggu Ke-							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Pembuatan proposal serta revisi								
Mendesain alat penghisap asap rokok								
Pengambilan data								
Analisa dan penulisan laporan serta revisi								
Seminar hasil								

### 3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat penelitian yang digunakan adalah

1. Unit Penghisap asap rokok
2. Electron spin resonance (ESR) unit
3. Osiloskop

Sedangkan bahan yang digunakan adalah rokok produksi nasional:

1. RN-1
2. RN-2
3. RN-3
4. RN-4
5. RN-5

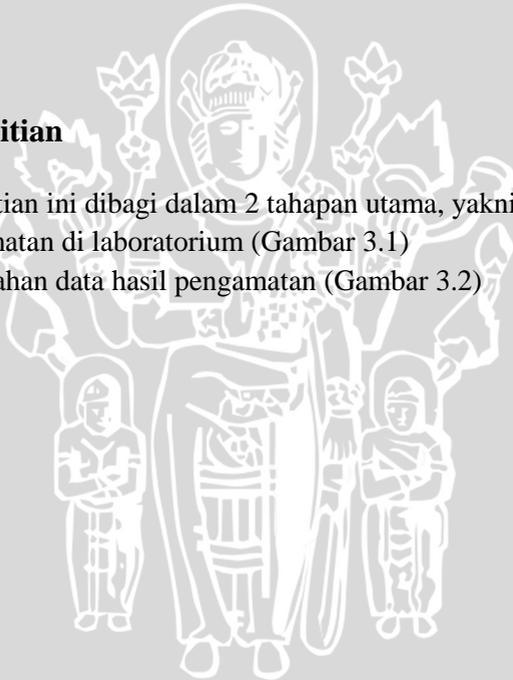
dan produksi lokal:

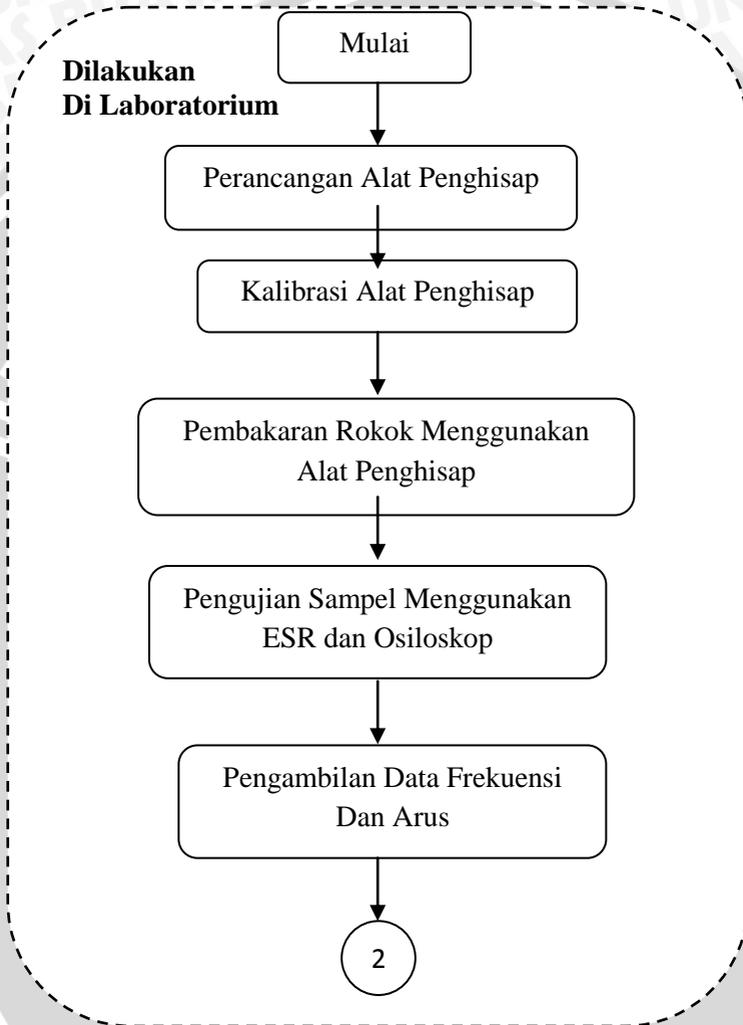
1. RL-1
2. RL-2
3. RL-3
4. RL-4
5. RL-5

### **3.3. Prosedur Penelitian**

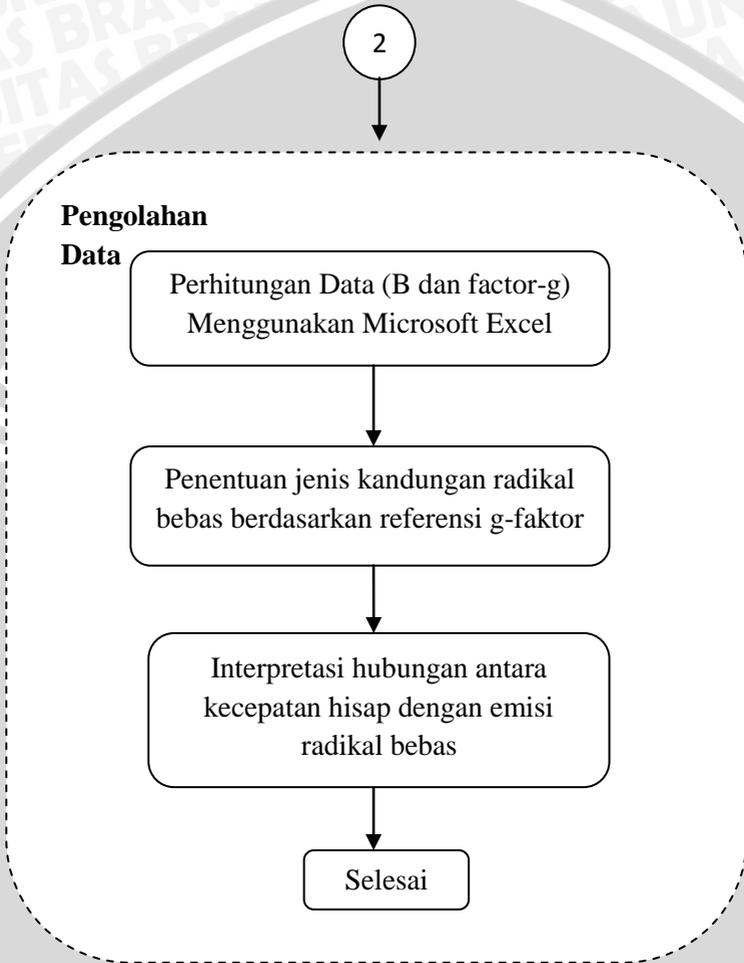
Prosedur penelitian ini dibagi dalam 2 tahapan utama, yakni

1. Tahap pengamatan di laboratorium (Gambar 3.1)
2. Tahap pengolahan data hasil pengamatan (Gambar 3.2)





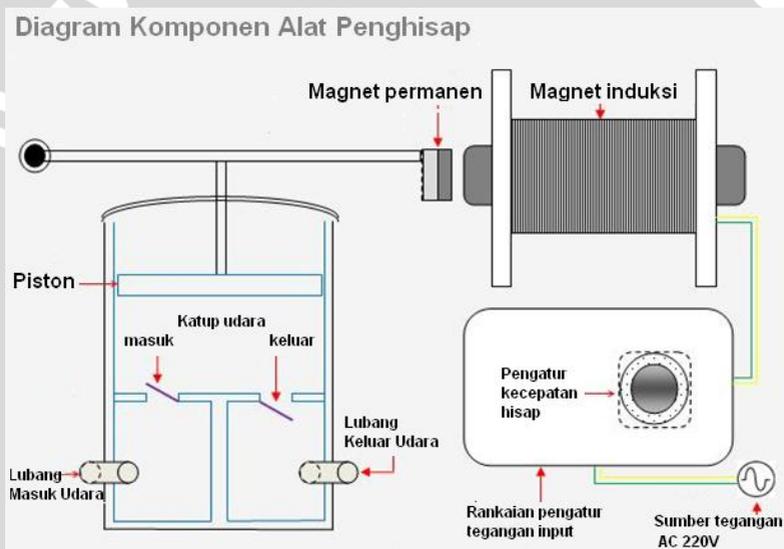
**Gambar 3.1. Alur Penelitian**



**Gambar 3.2. Alur Penelitian (Lanjutan)**

### 3.3.1. Perancangan Alat Penghisap

Pada tahap ini digunakan sebuah alat penghisap asap rokok. Alat penghisap tersebut merupakan integrasi antara pompa akuarium dengan sebuah rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengatur kecepatan hisap tersebut. Sebatang rokok dibakar untuk kemudian dihisap dengan kecepatan tertentu. Setelah sebatang rokok habis terbakar, maka filter tersebut dimasukkan dalam solenoid yang terintegrasi dengan unit ESR. Filter tersebut merupakan bahan utama dalam pendeteksian emisi radikal bebas yang menggunakan ESR.



Gambar 3.1. Blok diagram alat penghisap rokok

### 3.3.2. Kalibrasi Alat Penghisap

Alat penghisap ini dikalibrasi dengan menggunakan *air flow meter*. Prosedur ini digunakan untuk mendapatkan nilai kuantitatif kecepatan hisap serta untuk melihat seberapa stabil alat tersebut. Untuk

mendapatkan nilai kecepatan yang akurat, maka dilakukan pengambilan sample sebanyak 20 kali. Untuk setiap kecepatan tertentu, maka pencatatan dilakukan dalam selang waktu tiap 30 detik selama 10 menit.

Kemudian, untuk setiap merek rokok dilakukan tiga pengujian dengan kecepatan berbeda-beda, yakni  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ . Kecepatan  $v_1$  merupakan kecepatan minimal dimana pompa tersebut masih mampu untuk menghisap rokok. Kecepatan  $v_2$  untuk kecepatan menengah dan  $v_3$  untuk kecepatan hisap maksimal.

**Tabel 3.2. Kecepatan rata-rata alat penghisap**

Kecepatan terendah, $v_1$	Kecepatan menengah, $v_2$	Kecepatan tertinggi, $v_3$
0.1035	0.1585	0.1730

### 3.3.3. Pembakaran Sampel

Sampel yang digunakan merupakan batang rokok merek tertentu. Sebuah sampel kemudian dibakar dan dihisap menggunakan alat penghisap yang telah dirancang dan dikalibrasi sebelumnya. Saat satu buah sampel telah dibakar, maka sesegera mungkin dianalisis menggunakan ESR.

### 3.3.4. Pendeteksian Radikal Bebas

Pengukuran radikal bebas menggunakan ESR control unit dan osiloskop. Asap rokok yang telah di karantina dimasukkan dalam lubang solenoid. Osiloskop disetting untuk menampilkan gelombang Lissa Gause dengan caramenekan tombol display kemudian toggle untuk pilihan format XY.

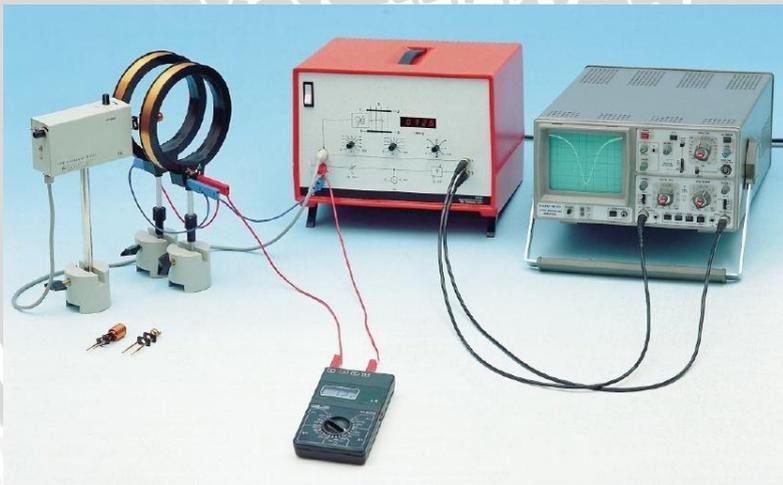
Parameter yang perlu dicatat adalah besarnya frekuensi yang ditampilkan oleh ESR dan besarnya arus yang tampil pada amperemeter. Tombol putar pada rangkaian solenoid menentukan besarnya frekuensi yang ditimbulkan. Tombol putar yang berada paling kiri pada ESR menentukan besarnya arus yang diberikan.

ESR berfungsi untuk menyelidiki kuantitas mikrofisis elektron. Dengan menggunakan metode resonansi, perbedaan energi antara dua spin dapat diukur secara langsung. Bahan yang akan diteliti diletakkan diantara sepasang koil helmholtz dan sebuah rf koil (dimana range frekuensinya adalah 15 hingga 150MHz). Koil rf merupakan bagian dari rangkaian resonansi paralel. Pada penelitian ini, sampel akan menyerap rf energi, sehingga ia akan mengubah hambatan AC (damping) dari rangkaian osilator. Sinyal modulasi dari medan magnet akan dimasukkan ke osiloskop melalui dua probe, yakni probe channel 1 dan channel 2. Dengan mengamati layar osiloskop, maka kita akan mendapatkan kurva untuk modulasi medan dan penyerapan ESR.

Frekuensi resonansi  $f$  yang timbul akibat kuat medan magnet  $B$  akan secara langsung tampil pada ESR control unit. Dari grafik  $f$ - $B$ , maka rasio giromagnetik (faktor- $g$ ) dapat ditentukan sesuai dengan sistem spin elektron masing-masing (Leybold Spin Resonance Catalog.pdf).

#### ***a. Proses Integrasi ESR unit dan Oscilloscope***

Pada tahap ini, semua alat disusun seperti pada gambar dibawah.



**Gambar 3.2. Integrasi osiloskop dengan ESR control unit**

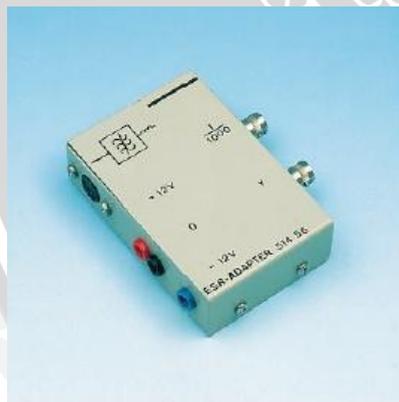
Integrasi rangkaian tersebut berguna untuk mendapatkan nilai faktor-g.



Gambar 3.3. ESR control unit



Gambar 3.4. ESR basic unit



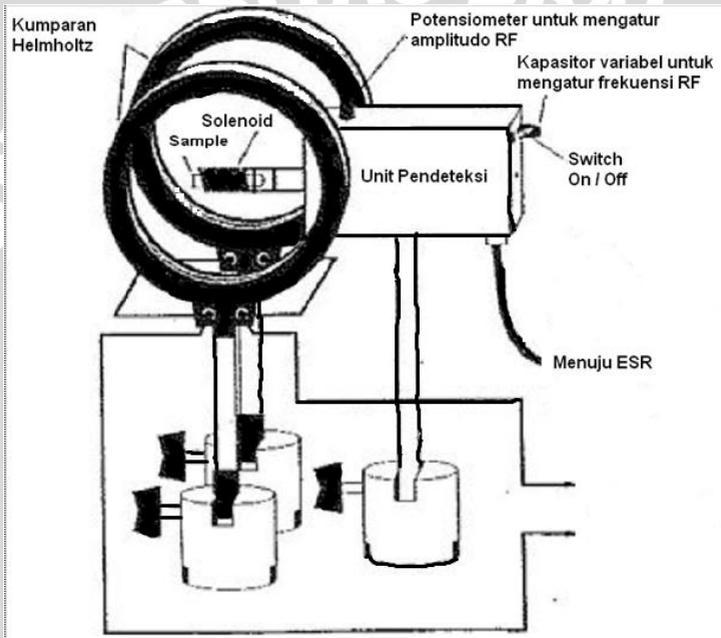
Gambar 3.5. ESR adapter



Gambar 3.6. Sepasang koil helmholtz

Dua probe pada osiloskop dihubungkan dengan ESR. Probe channel 1 mewakili gelombang yang ditimbulkan oleh ESR control unit, sedangkan probe channel 2 mewakili gelombang hasil dari superposisi antara gelombang yang masuk pada channel 1 dengan gelombang yang ditimbulkan oleh solenoid.

ESR basic unit digunakan untuk memberikan tegangan yang dibutuhkan dan mengolah sinyal digital berdasarkan frekuensi yang dihasilkan oleh rangkaian osilator.



Gambar 3.7. ESR basic unit

### ***b. Penentuan Pola Lissajous***

Setelah mendapatkan sampel, maka proses selanjutnya adalah untuk mengetahui berapa besar frekuensi dan arus yang diakibatkan oleh sampel tersebut. Proses pendeteksiannya adalah sebagai berikut.

1. Tekan tombol *display* lalu tekan tombol menu *format* dari mode *YT* ke mode *XY*. Tombol display tampak dilingkari pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. Osiloskop digital

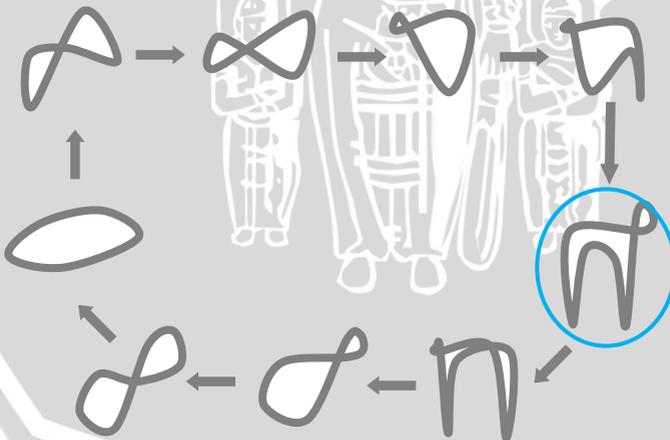
- Putar tombol RF magnetik pada ESR Basic unit sehingga tampilan tinggi pada osiloskop sesuai.



- Putar tombol  $U_{\text{mod}}$  pada ESR control unit sehingga tampilan besar gelombang tampak



- Putar tombol  $U_0$  pada ESR control unit sehingga didapatkan tampilan seperti pada gambar yang dilingkari.



- Putar tombol  $\phi$  pada ESR control unit sehingga didapatkan tampilan seperti pada gambar



- Putar tombol RF frekuensi pada ESR basic unit untuk mendapatkan tampilan simetris.



- Catat besar frekuensi yang tampil pada ESR control unit dan arus yang tampil pada amperemeter.

### 3.3.5. Pencatatan Nilai Frekuensi Dan Arus

Setelah pola Lissajous didapat, proses selanjutnya adalah mencatat besarnya nilai frekuensi yang tampil pada *ESR Control Unit* dan nilai arus yang tampil pada amperemeter. Nilai arus digunakan untuk menentukan kuatnya medan magnet B dan nilai frekuensi digunakan untuk mendapatkan faktor-g.

### 3.3.6. Perhitungan Nilai B dan faktor-g

Setelah didapat nilai frekuensi  $f$  dan arus  $I$ , maka dapat dilakukan analisa data untuk mendapatkan nilai faktor-g. Kerapatan gaya magnet dapat diketahui menggunakan hukum Biot-Savart dengan memasukkan nilai tersebut kedalam persamaan.

$$B = \mu_0 \left(\frac{4\pi}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{n}{r} \cdot I \quad (3.1)$$

dimana,

$n$  = jumlah lilitan pada koil, pada penelitian ini adalah 320 lilitan

$r$  = besarnya jari-jari pada koil, pada penelitian ini adalah 6,8 cm

$I$  = arus yang melewati koil

Nilai konstanta medan magnet diketahui

$$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \quad (3.2)$$

maka akan didapat nilai B dengan memasukkan nilai I yang kita peroleh dari penelitian:

$$\frac{B}{mT} = 4,32 \cdot 10^{-3} \frac{I}{A} \quad (3.3)$$

Besarnya nilai frekuensi resonansi adalah sebanding dengan nilai rapat flux gaya resonansi magnetic B. Sesuai dengan keadaan resonansi seperti persamaan berikut,

$$h \cdot f = g_s \cdot \mu_B \cdot B \quad (3.4)$$

maka didapatkan

$$\frac{f}{B} = \frac{g_s \cdot \mu_B}{h} \quad (3.5)$$

dimana,

$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$ , konstanta Plank

$\mu_0 = 9,273 \cdot 10^{-24} \text{Am}^2$ , Bohr Magneton

Akhirnya, faktor-g dapat ditentukan melalui persamaan

$$g_s = 7.14 \cdot 10^{-11} \frac{f}{B} \quad (3.6)$$

Untuk setiap sampel yang diuji dengan suatu kecepatan tertentu, data yang diambil sebanyak lima kali dan diasumsikan bahwa semakin banyak data yang diambil, maka hasil akan semakin akurat (jika terlalu banyak tentu akan membutuhkan waktu yang lama). Kemudian data untuk satu sampel dengan satu kecepatan dihitung nilai rata-ratanya, mulai dari frekuensi, arus, kuat medan magnet hingga g-faktor, sehingga semua nilai yang ada adalah nilai hasil perhitungan rata-rata.

Untuk setiap sampel hanya memiliki satu nilai, yakni nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata inilah yang kemudian diplot dalam bentuk grafik menggunakan Microsoft Office untuk mendapatkan kesimpulan mengenai pengaruh antara kecepatan hisap yang berbeda dengan emisi radikal bebas yang dihasilkannya.

### 3.3.7. Penentuan Jenis Radikal Bebas

Setelah nilai faktor-g diketahui berdasarkan perhitungan, selanjutnya dapat diketahui jenis radikal bebas yang dihasilkan sampel tersebut dengan merujuk pada referensi faktor-g. Faktor-g referensi dapat dilihat pada Lampiran 3.1.

Setiap jenis radikal bebas memiliki nilai factor-g tertentu. Misalnya, DPPH memiliki nilai factor-g sebesar 2.0036.

Untuk tiap-tiap kecepatan hisap, dihitung masing-masing deviasi f, deviasi I, deviasi B, dan deviasi faktor-g. Frekuensi (f) dan

arus (I) merupakan data yang didapat secara langsung melalui penelitian. Oleh karena itu, digunakan perumusan deviasi dari f dan I seperti persamaan (3.7) dan (3.8).

$$sf = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} |f_i - \bar{f}|^2}{n(n-1)}} \quad (3.7)$$

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} f_i}{n} \quad (3.8)$$

Sehingga nilai f adalah

$$f = \bar{f} \pm sf \quad (3.9)$$

Untuk mendapatkan nilai I, dimulai dengan menentukan standard deviasinya

$$sI = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j=n} |I_j - \bar{I}|^2}{n(n-1)}} \quad (3.10)$$

dimana

$$\bar{I} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} I_j}{n} \quad (3.11)$$

Sehingga nilai I adalah

$$I = \bar{I} \pm sI \quad (3.12)$$

Karena B bukan merupakan perhitungan langsung, melainkan hasil dari perhitungan I, maka untuk menghitung deviasi dari B, digunakan turunan dari deviasi I.

$$B = 4,32 \cdot 10^{-3} I \quad (3.13)$$

$$sB = \frac{\partial B}{\partial I} sI \quad (3.14)$$

$$sB = 4,32 \cdot 10^{-3} sI \quad (3.15)$$

Sehingga nilai B adalah

$$B = B \pm sB \quad (3.16)$$

Untuk mendapatkan nilai faktor-g, digunakan dua nilai, yakni f dan B. Nilai dari faktor g sendiri adalah

$$g = 7,14 \cdot 10^{-11} \frac{f}{B} \quad (3.17)$$

Kemudian nilai dari sg didapat dengan perumusan

$$sg = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial f} sf\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial B} sB\right)^2} \quad (3.18)$$

$$sg = \sqrt{\left(\frac{7,14 \cdot 10^{-11}}{B} sf\right)^2 + \left(\frac{7,14 \cdot 10^{-11}}{B^2} sB\right)^2} \quad (3.19)$$

Sehingga nilai B adalah

$$g = g \pm sg \quad (3.20)$$

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Kalibrasi Terhadap 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

DPPH merupakan radikal bebas stabil dari senyawa kimia organik yang berbentuk serbuk kristal. Sample DPPH digunakan sebagai alat kalibrasi untuk memastikan bahwa ESR benar-benar berfungsi sebagai mana mestinya. Sesuai dengan referensi, faktor-g untuk DPPH adalah sebesar 2.0036. Dalam penelitian ini didapat nilai faktor-g DPPH sebesar 2.018128655 seperti yang terlihat pada tabel 4.1.

**Tabel 4.1. Data pengamatan untuk DPPH**

Frekuensi (MHz)	Arus (mA)	B(mT)	Faktor-g
34.8	285	1.2312	2.018128655

Perbandingan antara nilai faktor-g hasil penelitian dengan faktor-g referensi terdapat selisih sebesar 1.4%. Jika semua data dikalibrasi dengan nilai koreksi sebesar 1.4%, maka hasilnya juga tidak jauh berbeda.



**Gambar 4.1. Tiga Jenis Pola Lissajous dari DPPH**

Gambar 4.1. merupakan gambar pola Lissajous dari sample DPPH dengan variasi tombol  $U_{\text{mod}}$ . Pola Lissajous untuk sampel DPPH lebih curam dibanding untuk sampel merek rokok.

## 4.2. Pengaruh Kecepatan Hisap Terhadap Emisi Radikal Bebas

Tujuan utama dari penelitian ini adalah mencari hubungan antara kecepatan hisap dengan emisi radikal bebas yang dihasilkan. Tabel 4.2 memperlihatkan emisi radikal bebas yang dihasilkan oleh berbagai merek rokok dengan kecepatan hisap sebesar 0.10 m/s atau  $v_1$ . Tabel 4.3 memperlihatkan jenis radikal bebas yang dihasilkan dimana kecepatan hisap rokok sebesar 0.16 m/s atau  $v_2$ . Sedangkan Tabel 4.4 memperlihatkan jenis radikal bebas yang dihasilkan dengan kecepatan hisap 0.17 m/s atau  $v_3$ . Ketiga tabel tersebut dapat dilihat pada bagian bawah.



Tabel 4.2. Nilai faktor-g dan jenis radikal bebas untuk kecepatan hisap v1 (0.10 m/s)

Jenis Rokok	Merek Rokok	$f \pm \delta f$ (Hz)	$I \pm \delta I$ (A)	$B \pm \delta B$ (mT)	$g \pm \delta g$	Radikal Bebas
Nasional	RN-1	$(3.26 \pm 0.00) \times 10^7$	$(4.62 \pm 0.30) \times 10^{-1}$	$1.960 \pm 0.125$	$1.188 \pm 0.076$	Unknown
	RN-2	$(3.33 \pm 0.01) \times 10^7$	$(2.96 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.253 \pm 0.043$	$1.897 \pm 0.065$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RN-3	$(3.30 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.07 \pm 0.13) \times 10^{-1}$	$1.299 \pm 0.055$	$1.815 \pm 0.077$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RN-4	$(3.25 \pm 0.07) \times 10^7$	$(4.12 \pm 0.61) \times 10^{-1}$	$1.740 \pm 0.260$	$1.330 \pm 0.199$	$O_2^-$
	RN-5	$(3.27 \pm 0.02) \times 10^7$	$(3.19 \pm 0.27) \times 10^{-1}$	$1.350 \pm 0.114$	$1.733 \pm 0.148$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
Lokal	RL-1	$(3.24 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.09 \pm 0.15) \times 10^{-1}$	$1.309 \pm 0.060$	$1.770 \pm 0.008$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$
	RL-2	$(3.27 \pm 0.01) \times 10^7$	$(2.83 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.199 \pm 0.040$	$1.946 \pm 0.058$	$O_2^-$ , $CO_2^-$ , $SO_4^-$ , $H_2O_2^-$
	RL-3	$(3.36 \pm 0.06) \times 10^7$	$(3.18 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.345 \pm 0.040$	$1.785 \pm 0.058$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$
	RL-4	$(3.26 \pm 0.02) \times 10^7$	$(3.15 \pm 0.40) \times 10^{-1}$	$1.334 \pm 0.150$	$1.744 \pm 0.204$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RL-5	$(3.28 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.16 \pm 0.50) \times 10^{-1}$	$1.527 \pm 0.220$	$1.533 \pm 0.227$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$

Tabel 4.3. Nilai faktor-g dan jenis radikal bebas untuk kecepatan hisap v2 (0.16 m/s)

Jenis Rokok	Merek Rokok	$f \pm \delta f$ (Hz)	$I \pm \delta I$ (A)	$B \pm \delta B$ (mT)	$g \pm \delta g$	Radikal Bebas
Nasional	RN-1	$(3.33 \pm 0.02) \times 10^7$	$(4.52 \pm 0.61) \times 10^{-1}$	$1.910 \pm 0.258$	$1.232 \pm 0.166$	Unknown
	RN-2	$(3.31 \pm 0.00) \times 10^7$	$(2.95 \pm 0.09) \times 10^{-1}$	$1.246 \pm 0.037$	$1.897 \pm 0.057$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RN-3	$(3.27 \pm 0.01) \times 10^7$	$(2.96 \pm 0.07) \times 10^{-1}$	$1.251 \pm 0.028$	$1.869 \pm 0.042$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RN-4	$(3.33 \pm 0.02) \times 10^7$	$(3.76 \pm 0.28) \times 10^{-1}$	$1.590 \pm 0.120$	$1.495 \pm 0.111$	$O_2^-$
	RN-5	$(3.30 \pm 0.03) \times 10^7$	$(2.82 \pm 0.06) \times 10^{-1}$	$1.192 \pm 0.020$	$1.979 \pm 0.049$	$O_2^-$ , $CO_2^-$ , $SO_4^-$ , $SO_3^-$ , $H_2O_2^-$
Lokal	RL-1	$(3.27 \pm 0.01) \times 10^7$	$(2.84 \pm 0.04) \times 10^{-1}$	$1.200 \pm 0.020$	$1.946 \pm 0.008$	$O_2^-$
	RL-2	$(3.30 \pm 0.01) \times 10^7$	$(2.94 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.244 \pm 0.040$	$1.893 \pm 0.068$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RL-3	$(3.27 \pm 0.02) \times 10^7$	$(2.86 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	$1.210 \pm 0.020$	$1.930 \pm 0.039$	$O_2^-$
	RL-4	$(3.24 \pm 0.01) \times 10^7$	$(2.89 \pm 0.04) \times 10^{-1}$	$1.221 \pm 0.020$	$1.894 \pm 0.030$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $FeS$
	RL-5	$(3.23 \pm 0.01) \times 10^7$	$(4.02 \pm 0.70) \times 10^{-1}$	$1.701 \pm 0.300$	$1.358 \pm 0.244$	$O_2^-$

Tabel 4.4. Nilai faktor-g dan jenis radikal bebas untuk kecepatan hisap v3 (0.17 m/s)

Jenis Rokok	Merek Rokok	$f \pm \delta f$ (Hz)	$I \pm \delta I$ (A)	$B \pm \delta B$ (mT)	$g \pm \delta g$	Radikal Bebas
Nasional	RN-1	$(1.96 \pm 0.00) \times 10^7$	$(3.23 \pm 0.39) \times 10^{-1}$	$1.367 \pm 0.164$	$1.026 \pm 0.123$	$O_2^-$
	RN-2	$(3.32 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.01 \pm 0.12) \times 10^{-1}$	$1.274 \pm 0.051$	$1.863 \pm 0.075$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RN-3	$(3.30 \pm 0.02) \times 10^7$	$(2.99 \pm 0.08) \times 10^{-1}$	$1.266 \pm 0.033$	$1.863 \pm 0.052$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RN-4	$(3.30 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.06 \pm 0.01) \times 10^{-1}$	$1.300 \pm 0.004$	$1.821 \pm 0.007$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$
	RN-5	$(3.31 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.08 \pm 1.20) \times 10^{-1}$	$1.302 \pm 0.520$	$1.816 \pm 0.732$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
Lokal	RL-1	$(3.27 \pm 0.01) \times 10^7$	$(3.39 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.444 \pm 0.050$	$1.626 \pm 0.007$	$O_2^-$
	RL-2	$(3.28 \pm 0.02) \times 10^7$	$(2.99 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.266 \pm 0.060$	$1.849 \pm 0.084$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$
	RL-3	$(3.30 \pm 0.02) \times 10^7$	$(2.91 \pm 0.01) \times 10^{-1}$	$1.232 \pm 0.040$	$1.916 \pm 0.058$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $FeS$
	RL-4	$(3.27 \pm 0.00) \times 10^7$	$(2.79 \pm 0.10) \times 10^{-1}$	$1.181 \pm 0.040$	$1.980 \pm 0.061$	$O_2^-$ , $CO_2^-$
	RL-5	$(3.25 \pm 0.02) \times 10^7$	$(3.40 \pm 0.70) \times 10^{-1}$	$1.437 \pm 0.300$	$1.614 \pm 0.335$	$O_2^-$ , $Fe^{2+}$ , $MnO_2$ , $FeS$

Pada Table 4.2 diatas semua merek rokok akan menghasilkan emisi radikal bebas  $O_2^-$  kecuali RN-1. Radikal bebas  $Fe^{2+}$  merupakan jenis radikal bebas yang menempati urutan kedua dalam keserangan muncul. Selanjutnya, radikal bebas yang sering muncul diikuti oleh  $FeS$  dan  $MnO_2$ . Jenis radikal bebas lain, seperti  $CO_2^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $H_2O_2^-$ , hanya muncul sekali pada kecepatan hisap terendah ini.

Tabel 4.3 menunjukkan jenis radikal bebas yang muncul untuk kecepatan hisap 0.16 m/s. Untuk kecepatan hisap v2, jenis radikal bebas yang muncul mirip dengan jenis radikal bebas yang muncul pada kecepatan hisap v1. Radikal bebas  $O_2^-$  masih merupakan jenis radikal bebas yang muncul disemua merek rokok kecuali RN-1 dan radikal bebas  $Fe^{2+}$  sebagai jenis radikal bebas kedua yang paling sering muncul. Namun pada kecepatan hisap v2 ini, radikal bebas  $FeS$  lebih sering muncul dibandingkan radikal bebas  $MnO_2$  - yang berbanding terbalik dengan kecepatan hisap v1. Radikal bebas lainnya yang muncul pada kecepatan hisap v2 ini adalah  $CO_2^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $SO_3^-$ , dan  $H_2O_2^-$ .

Radikal bebas apa saja yang muncul pada kecepatan hisap v3 ditunjukkan oleh Tabel 4.4. Untuk kecepatan hisap v3, radikal bebas  $O_2^-$  muncul disemua merek rokok tanpa kecuali. Kemudian, disusul oleh  $Fe^{2+}$  sebagai jenis radikal bebas kedua yang sering muncul. Radikal bebas  $FeS$  dan  $MnO_2$  merupakan jenis radikal bebas ketiga yang sering muncul.

### 4.3. Pembahasan

Semua rokok menghasilkan emisi radikal bebas. Jenis emisi radikal bebas yang dihasilkan utamanya merupakan radikal bebas  $O_2^-$ . Jenis radikal bebas yang dihasilkannya akan bervariasi tergantung pada jenis bahan yang digunakan untuk membuat rokok dan kecepatan hisap saat pembakaran.

Secara fisis kecepatan hisap yang tinggi akan menghasilkan konsentrasi uap air yang tinggi. Kecepatan tersebut tentu akan berpengaruh terhadap emisi radikal yang dihasilkan oleh sebatang

rokok. Pada kecepatan yang tinggi, jumlah oksigen yang diperlukan untuk pembakaran juga akan semakin besar.

Kemudian untuk kecepatan hisap v2 terdapat sedikit pemaksaan untuk suplai oksigen. Suplai oksigen berlebih ini diperlukan untuk mempercepat proses pembakaran rokok. Proses pembakaran yang dipercepat ini ternyata berpengaruh pula pada jenis radikal bebas yang dihasilkan. Selain  $O_2^-$ , pada level kecepatan ini juga didapati jenis radikal bebas lainnya, antara lain  $Fe^{2+}$ ,  $FeS$ , dan  $SO_4^-$ .

Terakhir, untuk kecepatan hisap v3 suplai oksigen yang diberikan sangatlah besar. Untuk proses pembakaran rokok normal, waktu yang diperlukan sekitar 20 menit. Untuk kecepatan hisap v3, waktu yang diperlukan hanyalah setengah menit. Terlihat bahwa jenis radikal bebas yang dihasilkan untuk kecepatan hisap v3 lebih bervariasi dibanding kecepatan hisap v1 dan v2. Selain  $O_2^-$ ,  $Fe^{2+}$ , dan  $FeS$  juga terdapat  $MnO_2$ , Hidroperoksida dan  $CO_2^-$ .

Saat proses pembakaran terjadi, terdapat 2 jenis reaksi pembakaran:

- reaksi pembakaran yang melibatkan oksigen dan terjadi pada suhu diatas  $800^{\circ}C$  serta hanya terjadi pada ujung rokok yang memiliki kontak langsung dengan udara, dan
- reaksi yang terjadi saat ketiadaan oksigen (pirolisis) dan terjadi pada rentang suhu antara  $400-800^{\circ}C$ .

Pada penelitian ini, relevansinya tentu untuk jenis reaksi pertama yang dipengaruhi oleh kecepatan hisap, dimana kecepatan hisap itu sendiri memerlukan oksigen. Reaksi pembakaran dengan oksigen akan menghasilkan senyawa  $H_2O$ ,  $CO_2$ , dan  $CO$ . Sedangkan reaksi pirolisis akan menghasilkan senyawa-senyawa kimia yang lebih kompleks. Penelitian ini hanya berhasil mengidentifikasi radikal bebas sederhana yang ditimbulkan oleh proses pembakaran yang melibatkan oksigen, seperti  $OH$ ,  $CO_2^-$ ,  $O_2^-$ , dan  $SO_4^-$ .

Berat unsur kimia yang terdapat pada daun tembakau kering antara lain Oksigen (O) sebesar 43%, Karbon (C) sebesar 43%, Hidrogen (H) sebesar 6%, dan Nitrogen (N) sebesar 5%. Sementara

unsur-unsur lain seperti Potassium (P), Kalsium (K), Magnesium (Mg), Sulfur (S), Chlorid (Cl), Besi (Fe), Mangan (Mn), Molybdenum (Mo), Seng (Zn), Boron (B), dan Tembaga (Cu), masing-masing hanya berkontribusi kurang dari 1% berat kering. Radikal bebas  $O_2^-$  merupakan salah satu radikal turunan oksigen selain, hidroksil ( $OH^-$ ), peroksil ( $ROO^-$ ), hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ), singlet oksigen ( $O_2$ ), oksida nitrit ( $NO^-$ ), peroksinitrit ( $ONOO^-$ ) dan asam hipoklorit ( $HOCl$ ) (Arief, 2012)(Alan, 2009).

Unsur utama yang terdapat pada tembakau antara lain karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Kemudian, unsur-unsur tersebut akan bereaksi karena pembakaran dengan  $O_2$  dan menghasilkan radikal bebas sebagai turunan. Radikal bebas turunan dari Oksigen dan Karbon seharusnya muncul pada semua sampel dan kecepatan karena kedua unsur tersebutlah yang memiliki prosentase paling tinggi sebagai unsur penyusun tembakau. Untuk penelitian ini, jenis yang paling umum muncul adalah  $O_2^-$ . Namun, radikal bebas jenis  $CO_2^-$ , hanya terdapat pada sampel RL-2 dengan kecepatan hisap v1, RN-5 untuk kecepatan hisap v2 dan RL-4 pada kecepatan hisap v3.

Unsur nitrogen akan menghasilkan radikal bebas jenis N-base. Pada penelitian ini, tidak diketahui adanya radikal bebas jenis N-base karena keterbatasan nilai referensi faktor-g. Unsur sulfur akan menghasilkan radikal bebas jenis S-base. Untuk radikal bebas jenis S-base, terdapat pada sampel RN-5 dalam bentuk  $SO_4^-$  dengan kecepatan hisap v2. Selain dalam bentuk  $SO_4^-$ , radikal jenis S-base juga berada dalam bentuk FeS dan terdapat pada kebanyakan sampel.

Selain unsur-unsur yang bersifat gas – seperti yang disebutkan diatas – tembakau juga mengandung unsur-unsur logam. Unsur-unsur logam tersebut antara lain adalah besi (Fe), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Seng (Zn) dan Tembaga (Cu). Unsur Fe, Mn dan Cu merupakan nutrisi bagi tembakau yang berasal dari tanah, sehingga kemungkinan ketiga unsur tersebut selalu melekat pada semua sampel yang diteliti. Radikal bebas jenis Fe berada dalam bentuk  $Fe^{2+}$  dan FeS. Radikal

bebas jenis  $Fe^{2+}$  merupakan jenis radikal bebas kedua yang paling sering ditemui setelah radikal bebas  $O_2^-$ .

Dengan melihat jenis radikal bebas apa saja yang muncul untuk berbagai kecepatan hisap, seperti yang tersaji pada Tabel 4.2, Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, kecepatan hisap tidak memiliki pola dan trend yang jelas dalam menentukan radikal bebas yang muncul. Dapat dilihat bahwa radikal bebas  $O_2^-$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $MnO_2$ , dan  $FeS$  adalah 4 jenis radikal bebas yang paling sering muncul.



# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan studi pengamatan tentang pengaruh kecepatan hisap dan radikal bebas yang dihasilkan dengan menggunakan ESR, maka didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Setiap rokok yang diteliti menghasilkan radikal bebas kecuali sampel RN-1 pada kecepatan hisap v1 dan v2.
2. Radikal bebas  $O_2^-$  muncul pada semua sample yang dihisap dengan kecepatan hisap yang berbeda.
3. Variasi radikal bebas timbul tergantung merek rokok.
4. Variasi kecepatan hisap menentukan jenis radikal bebas.

### 4.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Sampel harus dideteksi sesegera mungkin.
2. Tidak boleh ada gangguan medan magnet, asap serta getaran disekitar ESR.
3. Spesifikasi ESR perlu untuk ditingkatkan untuk mendapatkan nilai konsentrasi dari radikal bebas yang dideteksi.

# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



## DAFTAR PUSTAKA

- Adam, T. et al. 2009. *Influence Of Filter Ventilation On The Chemical Composition Of Cigarette Mainstream Smoke*. Elsevier.
- Baker, R.R. 2006. *Smoke Generation Inside A Burning Cigarette: Modifying Combustion To Develop Cigarettes That May Be Less Hazardous To Health*. Elsevier.
- Baum, S.L. et al. 2003. *Electron Spin Resonance And Spin Trap Investigation Of Free Radicals In Cigarette Smoke: Development Of A Quantification Procedure*. Elsevier
- Borgerding, M. dan H. Klus. 2005. *Analysis Of Complex Mixtures – Cigarette Smoke*. Elsevier
- Pappas, R.S et al. 2005. *Cadmium, Lead, And Thallium In Mainstream Tobacco Smoke Particulate*. Elsevier
- Pappas, R.S. et al. 2006. *Cadmium, Lead, And Thallium In Smoke Particulate From Counterfeit Cigarettes Compared To Authentic Us Brands*. Elsevier
- Roemer, E. et al. 2009. *Cytotoxicity, Mutagenicity, And Tumorigenicity Of Mainstream Smoke From Three Reference Cigarettes Machine-Smoked To The Same Yields Of Total Particulate Matter Per Cigarette*. Elsevier
- Slezakova, K., M.C. Pereira, M.C. Alvim-Ferraz. 2008. *Influence Of Tobacco Smoke On The Elemental Composition Of Indoor Particles Of Different Sizes*.

Elsevier.

Thielen, Anja, H. Klus, and L. Muller. 2007. *Tobacco Smoke: Unraveling A Controversial Subject*. Elsevier.

Tian, B.Z et al. 2008. *Blocking And Filtering Effect Of Bombyx Mori Silkworm Silk Fiber Filter Tips Against Mainstream Smoke Cigarettes*. Elsevier

Zang, L., K. Stone, dan W.A. Prayor. 1994. *Detection Of Free Radicals In Aqueous Extracts Of Cigarette Tar By Electron Spin Resonance*. Elsevier

<http://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>. diakses: 20 Mei 2012

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis>. diakses: 20 Mei 2012

[http://en.wikipedia.org/wiki/Tobacco\\_smoking](http://en.wikipedia.org/wiki/Tobacco_smoking). diakses: 20 Mei 2012

[http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic\\_aromatic\\_hydrocarbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic_aromatic_hydrocarbon). diakses: 20 Mei 2012

<http://en.wikipedia.org/wiki/Particulates>. diakses: 20 Mei 2012

<http://chej.org/wp-content/uploads/Documents/Dioxin%20Fact%20Sheet.pdf>, diakses: 20 Mei 2012

## LAMPIRAN 1

Tabel L.1.1. Data kalibrasi kecepatan hisap

No	Min (m/s)	Mid (M/s)	Max (m/s)
1	0.11	0.16	0.18
2	0.1	0.15	0.18
3	0.11	0.16	0.17
4	0.13	0.16	0.17
5	0.1	0.16	0.17
6	0.1	0.16	0.17
7	0.1	0.14	0.18
8	0.1	0.17	0.17
9	0.1	0.16	0.18
10	0.1	0.16	0.18
11	0.11	0.16	0.18
12	0.1	0.15	0.16
13	0.1	0.16	0.18
14	0.11	0.17	0.18
15	0.11	0.15	0.16
16	0.1	0.16	0.16
17	0.09	0.15	0.18
18	0.1	0.16	0.17
19	0.1	0.17	0.18
20	0.1	0.16	0.16
$\Sigma$	2.07	3.17	0.46
Rata-rata	0.1035	0.1585	0.173

## LAMPIRAN 2

Tabel L.2.1. Referensi faktor-g  
(Miller, 2001. Radford, 1985. Nonhebel, 1974)

Radikal Bebas	g-factor	g-factor
$O_2^-$	1.501	2.0356
O	1.501	
$Fe^{2+}$	1.77	1.86
$MnO_2$	1.8367	
FeS	1.86	
Hidroperoxida	1.9896	
$CO_2^-$	1.996	2.002
Cu	1.997	2
$SO_4^-$	1.9976	
Hydroxyl	2.00047	
$CO_2$	2.0007	
Alkoxy	2.0016	2.00197
Helium	2.002	
Methanol	2.00205	
Alkyl	2.00206	
Free Radicals	2.00232	
Hidrogen	2.00232	
Methyl	2.00255	
DPPH	2.0036	
$SO_3^-$	2.0037	
Ethyl	2.0044	
C	2.00505	2.00548
Peroxy	2.0155	2.0265
$O_2$	2.0356	
CuOx	2.098	
$CuGeO_3$	2.154	2.29
$YBa_2Cu_3O_7$	2.24	
Cu-HA	2.289	2.296
Hg	4	4.5

### LAMPIRAN 3

Tabel L.3.1. Data hasil pengamatan untuk sampel RN-1.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.26 \times 10^7$	$2.50 \times 10^9$	$4.19 \times 10^{-1}$	$1.91 \times 10^{-3}$						
	$3.26 \times 10^7$	$2.50 \times 10^9$	$5.28 \times 10^{-1}$	$4.26 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$2.50 \times 10^9$	$4.07 \times 10^{-1}$	$3.11 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$2.50 \times 10^9$	$4.97 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-3}$						
	$3.26 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$4.63 \times 10^{-1}$	$1.05 \times 10^{-2}$	$0.00 \times 10^7$	$0.29 \times 10^{-1}$	1.96	0.12	1.187674	0.075756
V2	$3.33 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{11}$	$6.12 \times 10^{-1}$	$2.57 \times 10^{-2}$						
	$3.20 \times 10^7$	$9.67 \times 10^{11}$	$6.40 \times 10^{-1}$	$3.54 \times 10^{-2}$						
	$3.30 \times 10^7$	$2.78 \times 10^8$	$4.20 \times 10^{-1}$	$1.01 \times 10^{-3}$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.36 \times 10^{10}$	$4.40 \times 10^{-1}$	$1.40 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.36 \times 10^{10}$	$3.40 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^{-2}$						
	$3.34 \times 10^7$	$1.74 \times 10^{11}$	$2.59 \times 10^{-1}$	$3.72 \times 10^{-2}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.27 \times 10^{12}$	$4.52 \times 10^{-1}$	$1.12 \times 10^{-1}$	$0.02 \times 10^7$	$0.61 \times 10^{-1}$	1.91	0.26	1.232562	0.166785
V3	$1.96 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$4.05 \times 10^{-1}$	$6.72 \times 10^{-3}$						
	$1.97 \times 10^7$	$5.63 \times 10^9$	$3.57 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{-3}$						
	$1.96 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$2.23 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-2}$						
	$1.96 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$3.07 \times 10^{-1}$	$2.56 \times 10^{-4}$						
	$1.96 \times 10^7$	$7.50 \times 10^9$	$3.23 \times 10^{-1}$	$1.81 \times 10^{-2}$	$0.00 \times 10^7$	$0.39 \times 10^{-1}$	1.37	0.16	1.025887	0.123481

Tabel L.3.2. Data hasil pengamatan untuk sampel RN-2.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.30 \times 10^7$	$7.84 \times 10^{10}$	$2.85 \times 10^{-1}$	$4.00 \times 10^{-6}$						
	$3.35 \times 10^7$	$4.84 \times 10^{10}$	$2.85 \times 10^{-1}$	$4.00 \times 10^{-6}$						
	$3.34 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{10}$	$3.07 \times 10^{-1}$	$5.76 \times 10^{-4}$						
	$3.33 \times 10^7$	$4.00 \times 10^8$	$3.21 \times 10^{-1}$	$1.44 \times 10^{-3}$						
	$3.32 \times 10^7$	$6.40 \times 10^9$	$2.83 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.33 \times 10^7$	$1.48 \times 10^{11}$	$2.96 \times 10^{-1}$	$2.03 \times 10^{-3}$	$0.00 \times 10^7$	$0.10 \times 10^{-1}$	1.253	0.043	1.897102	0.064681
V2	$3.32 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$2.83 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.31 \times 10^7$	$0.00 \times 10^{10}$	$2.84 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$2.84 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$3.11 \times 10^{-1}$	$7.84 \times 10^{-4}$						
	$3.32 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$3.11 \times 10^{-1}$	$7.84 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$4.00 \times 10^{10}$	$2.95 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$0.00 \times 10^7$	$0.09 \times 10^{-1}$	1.247	0.037	1.897089	0.057112
V3	$3.32 \times 10^7$	$1.60 \times 10^9$	$3.11 \times 10^{-1}$	$7.84 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.96 \times 10^{10}$	$3.11 \times 10^{-1}$	$7.84 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.96 \times 10^{10}$	$2.82 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.33 \times 10^7$	$3.60 \times 10^9$	$2.82 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.35 \times 10^7$	$6.76 \times 10^{10}$	$3.20 \times 10^{-1}$	$1.37 \times 10^{-3}$						
	$3.32 \times 10^7$	$1.12 \times 10^{11}$	$3.01 \times 10^{-1}$	$2.94 \times 10^{-3}$	$0.00 \times 10^7$	$0.12 \times 10^{-1}$	1.274	0.051	1.863368	0.075112

Tabel L.3.3. Data hasil pengamatan untuk sampel RN-3.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.35 \times 10^7$	$2.50 \times 10^{11}$	$3.20 \times 10^{-1}$	$1.09 \times 10^{-3}$						
	$3.30 \times 10^7$	$0.00 \times 10^0$	$3.21 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{-3}$						
	$3.27 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$3.20 \times 10^{-1}$	$1.09 \times 10^{-3}$						
	$3.27 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$2.87 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$2.87 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.30 \times 10^7$	$4.40 \times 10^{11}$	$3.07 \times 10^{-1}$	$3.33 \times 10^{-3}$	$0.01 \times 10^7$	$0.13 \times 10^{-1}$	1.299	0.054	1.810000	0.076765
V2	$3.31 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{11}$	$2.87 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.27 \times 10^7$	$4.00 \times 10^8$	$2.88 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.25 \times 10^7$	$4.84 \times 10^{10}$	$2.87 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.25 \times 10^7$	$4.84 \times 10^{10}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-4}$						
	$3.28 \times 10^7$	$6.40 \times 10^9$	$3.08 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-4}$						
	$3.27 \times 10^7$	$2.48 \times 10^{11}$	$2.96 \times 10^{-1}$	$8.83 \times 10^{-4}$	$0.01 \times 10^7$	$0.07 \times 10^{-1}$	1.251	0.028	1.868966	0.042489
V3	$3.28 \times 10^7$	$4.84 \times 10^{10}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-4}$						
	$3.24 \times 10^7$	$3.84 \times 10^{11}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-4}$						
	$3.34 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{11}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-4}$						
	$3.34 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{11}$	$2.86 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.31 \times 10^7$	$6.40 \times 10^9$	$2.86 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.30 \times 10^7$	$7.28 \times 10^{11}$	$3.20 \times 10^{-1}$	$1.33 \times 10^{-3}$	$0.02 \times 10^7$	$0.08 \times 10^{-1}$	1.266	0.034	1.863408	0.051822

Tabel L.3.4. Data hasil pengamatan untuk sampel RN-4.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.25 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{12}$	$5.00 \times 10^{-1}$	$4.00 \times 10^{-2}$						
	$3.25 \times 10^7$	$2.25 \times 10^{12}$	$4.08 \times 10^{-1}$	$3.92 \times 10^{-2}$						
	$3.25 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{12}$	$3.29 \times 10^{-1}$	$7.51 \times 10^{-2}$						
	$3.25 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{12}$	$6.78 \times 10^{-1}$	$7.45 \times 10^{-3}$	$0.07 \times 10^7$	$0.61 \times 10^{-1}$	1.745	0.258	1.330845	0.199069
V2	$3.20 \times 10^7$	$4.69 \times 10^{10}$	$6.76 \times 10^{-1}$	$8.49 \times 10^{-3}$						
	$3.23 \times 10^7$	$4.69 \times 10^{10}$	$7.52 \times 10^{-1}$	$3.12 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$4.69 \times 10^{10}$	$4.12 \times 10^{-1}$	$3.67 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{11}$	$2.84 \times 10^{-1}$	$3.67 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$3.36 \times 10^{10}$	$4.32 \times 10^{-1}$	$1.04 \times 10^{-2}$						
	$3.30 \times 10^7$	$6.14 \times 10^{11}$	$3.57 \times 10^{-1}$	$7.38 \times 10^{-4}$						
	$3.30 \times 10^7$	$8.88 \times 10^{11}$	$3.57 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-2}$	$0.02 \times 10^7$	$0.28 \times 10^{-1}$	1.592	0.118	1.495456	0.111428
V3	$3.35 \times 10^7$	$4.00 \times 10^8$	$4.78 \times 10^{-1}$	$1.76 \times 10^{-5}$						
	$3.41 \times 10^7$	$4.84 \times 10^{10}$	$3.49 \times 10^{-1}$	$3.24 \times 10^{-6}$						
	$3.33 \times 10^7$	$4.00 \times 10^8$	$3.76 \times 10^{-1}$	$6.40 \times 10^{-7}$						
	$3.30 \times 10^7$	$6.40 \times 10^9$	$3.02 \times 10^{-1}$	$6.40 \times 10^{-7}$						
	$3.28 \times 10^7$	$3.24 \times 10^{10}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$6.40 \times 10^{-7}$						
	$3.30 \times 10^7$	$8.80 \times 10^{10}$	$3.07 \times 10^{-1}$	$2.28 \times 10^{-5}$	$0.01 \times 10^7$	$0.01 \times 10^{-1}$	1.296	0.004	1.820809	0.007327

Tabel L.3.5. Data hasil pengamatan untuk sampel RN-5.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.21 \times 10^7$	$4.10 \times 10^{11}$	$3.58 \times 10^{-1}$	$6.72 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$3.57 \times 10^{-1}$	$6.56 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$3.02 \times 10^{-1}$	$6.76 \times 10^{-4}$						
	$3.33 \times 10^7$	$3.14 \times 10^{11}$	$3.02 \times 10^{-1}$	$6.76 \times 10^{-4}$						
	$3.33 \times 10^7$	$3.14 \times 10^{11}$	$2.76 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.27 \times 10^7$	$1.15 \times 10^{12}$	$3.19 \times 10^{-1}$	$1.46 \times 10^{-2}$	$0.02 \times 10^7$	$0.27 \times 10^{-1}$	1.35	0.114	1.732928	0.147509
V2	$3.33 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$2.76 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.21 \times 10^7$	$8.10 \times 10^{11}$	$2.76 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.25 \times 10^7$	$2.50 \times 10^{11}$	$2.76 \times 10^{-1}$	$0.00 \times 10^0$						
	$3.37 \times 10^7$	$4.90 \times 10^{11}$	$2.75 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.34 \times 10^7$	$1.60 \times 10^{11}$	$3.05 \times 10^{-1}$	$8.41 \times 10^{-4}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.80 \times 10^{12}$	$2.82 \times 10^{-1}$	$8.42 \times 10^{-4}$	$0.03 \times 10^7$	$0.06 \times 10^{-1}$	1.192	0.027	1.978672	0.049012
V3	$3.34 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$3.05 \times 10^{-1}$	$8.41 \times 10^{-4}$						
	$3.31 \times 10^7$	$0.00 \times 10^0$	$3.05 \times 10^{-1}$	$8.41 \times 10^{-4}$						
	$3.29 \times 10^7$	$4.00 \times 10^{10}$	$3.22 \times 10^{-1}$	$2.12 \times 10^{-3}$						
	$3.31 \times 10^7$	$0.00 \times 10^0$	$3.22 \times 10^{-1}$	$2.12 \times 10^{-3}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$2.85 \times 10^{-1}$	$8.10 \times 10^{-5}$						
	$3.31 \times 10^7$	$1.40 \times 10^{11}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$5.99 \times 10^{-3}$	$0.01 \times 10^7$	$0.17 \times 10^{-1}$	1.302	0.073	1.815733	0.102235

Tabel L.3.6. Data hasil pengamatan untuk sampel RL-1.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	I(A)	$ f - \bar{f} ^2$	$\delta f$	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta I$	$\delta B$	$\delta g$	B(mT)	g-faktor
V1	$3.28 \times 10^7$	$2.79 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{11}$		$9.24 \times 10^{-4}$					
	$3.21 \times 10^7$	$2.78 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{11}$		$9.86 \times 10^{-4}$					
	$3.26 \times 10^7$	$3.61 \times 10^{-1}$	$2.56 \times 10^{10}$		$2.66 \times 10^{-3}$					
	$3.26 \times 10^7$	$3.15 \times 10^{-1}$	$2.56 \times 10^{10}$		$3.14 \times 10^{-5}$					
	$3.21 \times 10^7$	$3.14 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{11}$		$2.12 \times 10^{-5}$					
	$3.24 \times 10^7$	$3.09 \times 10^{-1}$	$4.12 \times 10^{11}$	$0.01 \times 10^7$	$4.63 \times 10^{-3}$	$0.15 \times 10^{-1}$	0.064	0.007842	1.309	1.770325
V2	$3.30 \times 10^7$	$2.96 \times 10^{-1}$	$1.02 \times 10^{11}$		$1.54 \times 10^{-4}$					
	$3.24 \times 10^7$	$2.76 \times 10^{-1}$	$7.84 \times 10^{10}$		$5.78 \times 10^{-5}$					
	$3.29 \times 10^7$	$2.75 \times 10^{-1}$	$4.84 \times 10^{10}$		$7.40 \times 10^{-5}$					
	$3.23 \times 10^7$	$2.93 \times 10^{-1}$	$1.44 \times 10^{11}$		$8.84 \times 10^{-5}$					
	$3.28 \times 10^7$	$2.78 \times 10^{-1}$	$1.44 \times 10^{10}$		$3.14 \times 10^{-5}$					
	$3.27 \times 10^7$	$2.84 \times 10^{-1}$	$3.88 \times 10^{11}$	$0.01 \times 10^7$	$4.05 \times 10^{-4}$	$0.04 \times 10^{-1}$	0.019	0.008294	1.200	1.945666
V3	$3.26 \times 10^7$	$3.43 \times 10^{-1}$	$3.60 \times 10^9$		$1.44 \times 10^{-5}$					
	$3.23 \times 10^7$	$3.43 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{11}$		$1.44 \times 10^{-5}$					
	$3.24 \times 10^7$	$3.57 \times 10^{-1}$	$6.76 \times 10^{10}$		$3.17 \times 10^{-4}$					
	$3.30 \times 10^7$	$3.57 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{11}$		$3.17 \times 10^{-4}$					
	$3.30 \times 10^7$	$2.96 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{11}$		$1.87 \times 10^{-3}$					
	$3.27 \times 10^7$	$3.39 \times 10^{-1}$	$4.32 \times 10^{11}$	$0.01 \times 10^7$	$2.53 \times 10^{-3}$	$0.11 \times 10^{-1}$	0.048	0.00732	1.435	1.625746

Tabel L.3.7. Data hasil pengamatan untuk sampel RL-2.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.28 \times 10^7$	$2.25 \times 10^{10}$	$3.10 \times 10^{-1}$	$7.11 \times 10^{-4}$						
	$3.26 \times 10^7$	$2.50 \times 10^9$	$3.09 \times 10^{-1}$	$6.59 \times 10^{-4}$						
	$3.25 \times 10^7$	$2.25 \times 10^{10}$	$2.73 \times 10^{-1}$	$1.07 \times 10^{-4}$						
	$3.21 \times 10^7$	$3.03 \times 10^{11}$	$2.70 \times 10^{-1}$	$1.78 \times 10^{-4}$						
	$3.29 \times 10^7$	$6.25 \times 10^{10}$	$2.69 \times 10^{-1}$	$2.05 \times 10^{-4}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.23 \times 10^{11}$	$2.69 \times 10^{-1}$	$2.05 \times 10^{-4}$						
	$3.27 \times 10^7$	$5.35 \times 10^{11}$	$2.83 \times 10^{-1}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$0.01 \times 10^7$	$0.08 \times 10^{-1}$	1.199	0.035	1.94571	0.057532
V2	$3.32 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$3.08 \times 10^{-1}$	$1.96 \times 10^{-4}$						
	$3.32 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$2.69 \times 10^{-1}$	$6.25 \times 10^{-4}$						
	$3.29 \times 10^7$	$3.60 \times 10^9$	$2.68 \times 10^{-1}$	$6.76 \times 10^{-4}$						
	$3.27 \times 10^7$	$6.76 \times 10^{10}$	$3.15 \times 10^{-1}$	$4.41 \times 10^{-4}$						
	$3.28 \times 10^7$	$2.56 \times 10^{10}$	$3.10 \times 10^{-1}$	$2.56 \times 10^{-4}$						
	$3.30 \times 10^7$	$2.12 \times 10^{11}$	$2.94 \times 10^{-1}$	$2.19 \times 10^{-3}$	$0.01 \times 10^7$	$0.10 \times 10^{-1}$	1.244	0.044	1.892921	0.067694
V3	$3.24 \times 10^7$	$1.30 \times 10^{11}$	$3.48 \times 10^{-1}$	$2.38 \times 10^{-3}$						
	$3.33 \times 10^7$	$2.92 \times 10^{11}$	$3.00 \times 10^{-1}$	$6.40 \times 10^{-7}$						
	$3.30 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$3.00 \times 10^{-1}$	$6.40 \times 10^{-7}$						
	$3.25 \times 10^7$	$6.76 \times 10^{10}$	$2.77 \times 10^{-1}$	$4.93 \times 10^{-4}$						
	$3.26 \times 10^7$	$2.56 \times 10^{10}$	$2.71 \times 10^{-1}$	$7.95 \times 10^{-4}$						
	$3.28 \times 10^7$	$5.72 \times 10^{11}$	$2.99 \times 10^{-1}$	$3.67 \times 10^{-3}$	$0.02 \times 10^7$	$0.14 \times 10^{-1}$	1.266	0.057	1.848736	0.084253

Tabel L.3.8. Data hasil pengamatan untuk sampel RL-3.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.24 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{12}$	$3.16 \times 10^{-1}$	$3.36 \times 10^{-6}$						
	$3.21 \times 10^7$	$2.25 \times 10^{12}$	$3.41 \times 10^{-1}$	$5.37 \times 10^{-4}$						
	$3.33 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$3.41 \times 10^{-1}$	$5.37 \times 10^{-4}$						
	$3.55 \times 10^7$	$3.61 \times 10^{12}$	$3.17 \times 10^{-1}$	$6.94 \times 10^{-7}$						
	$3.55 \times 10^7$	$3.61 \times 10^{12}$	$3.01 \times 10^{-1}$	$2.83 \times 10^{-4}$						
	$3.28 \times 10^7$	$6.40 \times 10^{11}$	$2.91 \times 10^{-1}$	$7.20 \times 10^{-4}$						
	$3.36 \times 10^7$	$1.16 \times 10^{13}$	$3.18 \times 10^{-1}$	$2.08 \times 10^{-3}$	$0.06 \times 10^7$	$0.08 \times 10^{-1}$	1.345	0.035	1.784976	0.057295
V2	$3.35 \times 10^7$	$6.40 \times 10^{11}$	$2.76 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-4}$						
	$3.24 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$2.75 \times 10^{-1}$	$1.21 \times 10^{-4}$						
	$3.24 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$3.05 \times 10^{-1}$	$3.61 \times 10^{-4}$						
	$3.28 \times 10^7$	$1.00 \times 10^{10}$	$2.85 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-6}$						
	$3.24 \times 10^7$	$9.00 \times 10^{10}$	$2.89 \times 10^{-1}$	$9.00 \times 10^{-6}$						
	$3.27 \times 10^7$	$9.20 \times 10^{11}$	$2.86 \times 10^{-1}$	$5.92 \times 10^{-4}$	$0.02 \times 10^7$	$0.05 \times 10^{-1}$	1.21	0.023	1.93052	0.038846
V3	$3.30 \times 10^7$	$2.78 \times 10^8$	$2.70 \times 10^{-1}$	$4.48 \times 10^{-4}$						
	$3.26 \times 10^7$	$1.47 \times 10^{11}$	$2.70 \times 10^{-1}$	$4.48 \times 10^{-4}$						
	$3.26 \times 10^7$	$1.47 \times 10^{11}$	$3.11 \times 10^{-1}$	$3.93 \times 10^{-4}$						
	$3.27 \times 10^7$	$8.03 \times 10^{10}$	$3.11 \times 10^{-1}$	$3.93 \times 10^{-4}$						
	$3.35 \times 10^7$	$2.67 \times 10^{11}$	$3.10 \times 10^{-1}$	$3.55 \times 10^{-4}$						
	$3.35 \times 10^7$	$2.67 \times 10^{11}$	$2.75 \times 10^{-1}$	$2.61 \times 10^{-4}$						
	$3.30 \times 10^7$	$9.08 \times 10^{11}$	$2.91 \times 10^{-1}$	$2.30 \times 10^{-3}$	$0.02 \times 10^7$	$0.09 \times 10^{-1}$	1.232	0.037	1.912694	0.058382

Tabel L.3.9. Data hasil pengamatan untuk sampel RL-4.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.28 \times 10^7$	$5.90 \times 10^{10}$	$2.54 \times 10^{-1}$	$3.76 \times 10^{-3}$						
	$3.30 \times 10^7$	$1.96 \times 10^{11}$	$3.01 \times 10^{-1}$	$2.04 \times 10^{-4}$						
	$3.25 \times 10^7$	$3.27 \times 10^9$	$3.01 \times 10^{-1}$	$2.04 \times 10^{-4}$						
	$3.25 \times 10^7$	$3.27 \times 10^9$	$2.85 \times 10^{-1}$	$9.17 \times 10^{-4}$						
	$3.29 \times 10^7$	$1.18 \times 10^{11}$	$2.85 \times 10^{-1}$	$9.17 \times 10^{-4}$						
	$3.21 \times 10^7$	$2.09 \times 10^{11}$	$4.99 \times 10^{-1}$	$3.38 \times 10^{-2}$						
	$3.21 \times 10^7$	$2.09 \times 10^{11}$	$2.82 \times 10^{-1}$	$1.11 \times 10^{-3}$						
	$3.26 \times 10^7$	$7.97 \times 10^{11}$	$3.15 \times 10^{-1}$	$4.09 \times 10^{-2}$	$0.02 \times 10^7$	$0.37 \times 10^{-1}$	1.334	0.156	1.74355	0.204269
V2	$3.21 \times 10^7$	$7.84 \times 10^{10}$	$2.81 \times 10^{-1}$	$5.78 \times 10^{-5}$						
	$3.25 \times 10^7$	$1.44 \times 10^{10}$	$2.82 \times 10^{-1}$	$4.36 \times 10^{-5}$						
	$3.28 \times 10^7$	$1.76 \times 10^{11}$	$2.81 \times 10^{-1}$	$5.78 \times 10^{-5}$						
	$3.21 \times 10^7$	$7.84 \times 10^{10}$	$3.00 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{-4}$						
	$3.24 \times 10^7$	$4.00 \times 10^8$	$2.99 \times 10^{-1}$	$1.08 \times 10^{-4}$						
	$3.24 \times 10^7$	$3.48 \times 10^{11}$	$2.89 \times 10^{-1}$	$3.97 \times 10^{-4}$	$0.01 \times 10^7$	$0.04 \times 10^{-1}$	1.221	0.019	1.894406	0.030254
V3	$3.27 \times 10^7$	$1.60 \times 10^9$	$3.15 \times 10^{-1}$	$1.28 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$2.88 \times 10^{-1}$	$7.74 \times 10^{-5}$						
	$3.28 \times 10^7$	$3.60 \times 10^9$	$2.70 \times 10^{-1}$	$8.46 \times 10^{-5}$						
	$3.29 \times 10^7$	$2.56 \times 10^{10}$	$2.70 \times 10^{-1}$	$8.46 \times 10^{-5}$						
	$3.28 \times 10^7$	$3.60 \times 10^9$	$2.53 \times 10^{-1}$	$6.86 \times 10^{-4}$						
	$3.27 \times 10^7$	$9.20 \times 10^{10}$	$2.79 \times 10^{-1}$	$2.21 \times 10^{-3}$	$0.01 \times 10^7$	$0.08 \times 10^{-1}$	1.181	0.036	1.979957	0.061024

Tabel L.3.10. Data hasil pengamatan untuk sampel RL-5.

Kecepatan Hisap	f(Hz)	$ f - \bar{f} ^2$	i(A)	$ I - \bar{I} ^2$	$\delta f$	$\delta I$	B(mT)	$\delta B$	g	$\delta g$
V1	$3.24 \times 10^7$	$1.34 \times 10^{11}$	$3.17 \times 10^{-1}$	$1.92 \times 10^{-3}$						
	$3.24 \times 10^7$	$1.34 \times 10^{11}$	$5.81 \times 10^{-1}$	$4.85 \times 10^{-2}$						
	$3.30 \times 10^7$	$5.44 \times 10^{10}$	$3.63 \times 10^{-1}$	$4.69 \times 10^{-6}$						
	$3.30 \times 10^7$	$5.44 \times 10^{10}$	$1.73 \times 10^{-1}$	$3.53 \times 10^{-2}$						
	$3.30 \times 10^7$	$5.44 \times 10^{10}$	$3.68 \times 10^{-1}$	$5.14 \times 10^{-5}$						
	$3.28 \times 10^7$	$1.11 \times 10^9$	$3.63 \times 10^{-1}$	$4.69 \times 10^{-6}$						
	$3.28 \times 10^7$	$4.33 \times 10^{11}$	$3.61 \times 10^{-1}$	$8.57 \times 10^{-2}$	$0.01 \times 10^7$	$0.53 \times 10^{-1}$	1.527	0.226	1.533268	0.227231
V2	$3.26 \times 10^7$	$6.76 \times 10^{10}$	$6.88 \times 10^{-1}$	$8.18 \times 10^{-2}$						
	$3.21 \times 10^7$	$5.76 \times 10^{10}$	$3.41 \times 10^{-1}$	$3.72 \times 10^{-3}$						
	$3.22 \times 10^7$	$1.96 \times 10^{10}$	$3.41 \times 10^{-1}$	$3.72 \times 10^{-3}$						
	$3.24 \times 10^7$	$3.60 \times 10^9$	$3.46 \times 10^{-1}$	$3.14 \times 10^{-3}$						
	$3.24 \times 10^7$	$3.60 \times 10^9$	$2.94 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-2}$						
	$3.23 \times 10^7$	$1.52 \times 10^{11}$	$4.02 \times 10^{-1}$	$1.04 \times 10^{-1}$	$0.01 \times 10^7$	$0.72 \times 10^{-1}$	1.701	0.305	1.358334	0.243731
V3	$3.34 \times 10^7$	$8.56 \times 10^{11}$	$3.39 \times 10^{-1}$	$3.91 \times 10^{-7}$						
	$3.23 \times 10^7$	$3.06 \times 10^{10}$	$3.39 \times 10^{-1}$	$3.91 \times 10^{-7}$						
	$3.25 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$3.38 \times 10^{-1}$	$2.64 \times 10^{-6}$						
	$3.25 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$1.13 \times 10^{-1}$	$5.14 \times 10^{-2}$						
	$3.25 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$2.47 \times 10^{-1}$	$8.58 \times 10^{-3}$						
	$3.25 \times 10^7$	$6.25 \times 10^8$	$1.44 \times 10^{-1}$	$3.83 \times 10^{-2}$						
	$3.18 \times 10^7$	$4.56 \times 10^{11}$	$7.50 \times 10^{-1}$	$1.68 \times 10^{-1}$						
	$3.23 \times 10^7$	$3.06 \times 10^{10}$	$4.47 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^{-2}$						
	$3.25 \times 10^7$	$1.38 \times 10^{12}$	$3.40 \times 10^{-1}$	$2.78 \times 10^{-1}$	$0.02 \times 10^7$	$0.70 \times 10^{-1}$	1.437	0.298	1.614515	0.335123





**Gambar L.4.3. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RL-3**



**Gambar L.4.4. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RL-4**



**Gambar L.4.5. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RL-5**



**Gambar L.4.6. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RN-1**



**Gambar L.4.7. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RN-2**



**Gambar L.4.8. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RN-3**



**Gambar L.4.9. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RN-4**



**Gambar L.4.10. Pola Lissa Gauss Untuk Sampel RN-5**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

