



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA PERCIKAN DAN  
LETUPAN MINYAK NABATI PANAS AKIBAT PENETESAN  
BUTIRAN AIR**

**SKRIPSI**

**NAMA: I GEDE WAHYU WIDIATMIKA ARIASA  
NPM: 0706198594**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA PERCIKAN DAN  
LETUPAN MINYAK NABATI PANAS AKIBAT PENETESAN  
BUTIRAN AIR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

**NAMA: I GEDE WAHYU WIDIATMIKA ARIASA  
NPM: 0706198594**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
KEKHUSUSAN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2010**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### **STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA PERCIKAN DAN LETUPAN MINYAK NABATI PANAS AKIBAT PENETESAN BUTIRAN AIR**

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui, bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : I GEDE WAHYU W A

NPM : 0706198594

Tanda Tangan :

Tanggal : 21 Juni 2010

## PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : I GEDE WAHYU WIDIATMIKA ARIASA  
NPM : 0706198594  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA  
PERCIKAN DAN LETUPAN MINYAK  
NABATI PANAS AKIBAT PENETESAN  
BUTIRAN AIR

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, MSc, PhD ( )

Pembimbing : Dr. Ir. Danardono AS, DEA ( )

Penguji : Prof. Dr.-Ing. Ir. Raldi Artono Koestoer ( )

Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim M.Eng ( )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 30 Juni 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur, Penulis panjatkan kepada Ida Sang Hyang Widhi karena atas segala wara nugrahaNya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Dalam penelitian ini, Penulis banyak menerima saran, bimbingan, bantuan dan informasi dari berbagai pihak, sehingga Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Untuk itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Bapak Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc, Ph.D dan Bapak Dr. Ir. Danardono A.S, DEA selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan ide tentang topik skripsi serta telah meluangkan waktu & tenaga dalam memberikan saran dan bimbingan.
- (2) Dosen-dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan waktu dan bimbingan dalam memberikan saran dan masukan.
- (3) Kedua orang tua dan adik penulis yang telah memberikan dukungan dan doa, sampai penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
- (4) Stevanus Sagala selaku rekan kerja skripsi penulis, Mariance, Raka, Reza, Tasya, Ardi, Hermanto, Mas Yasin, Mas Syarif dan Mas Marwi yang telah banyak membantu dalam pengambilan data serta semua teman angkatan 2007, 2008, 2006 PPSE Teknik Mesin UI yang turut memberikan dukungan dan kontribusi dalam menyelesaikan penelitian skripsi ini.
- (5) Ida Alawiyah yang selalu memberikan semangat, doa dan dukungannya.
- (6) Dan seluruh karyawan staf Departemen Teknik Mesin FTUI yang telah membantu memberi saran, menyediakan dan meminjamkan peralatan serta sarana dalam pengerjaan alat.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 21 Juni 2010

Penulis

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK  
KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : I GEDE WAHYU WIDIATMIKA ARIASA  
NPM : 0706198594  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA PERCIKAN DAN LETUPAN  
MINYAK NABATI PANAS AKIBAT PENETESAN BUTIRAN AIR**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Juni 2010

Yang menyatakan

( I Gede Wahyu )

## ABSTRAK

Nama : I GEDE WAHYU WIDIATMIKA ARIASA  
Program Studi : TEKNIK MESIN  
Judul : STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA PERCIKAN DAN  
LETUPAN MINYAK NABATI PANAS AKIBAT  
PENETESAN BUTIRAN AIR

Suatu eksperimen penetesanan butir air (droplet) pada minyak goreng (nabati) panas dengan temperatur di bawah titik nyalanya dilakukan untuk memahami fenomena percikan dan letupan minyak goreng yang dikaitkan dengan metode pengendalian api yang berasal dari minyak goreng. Beberapa faktor yang berpengaruh berupa ketinggian penetesanan, diameter droplet, temperatur minyak goreng akan memberikan fenomena yang berbeda terutama dalam hal pembentukan kawah yang terjadi, cipratan, intensitas dan kekuatan letupan serta pengaruhnya terhadap fluktuasi temperatur minyak goreng. Sebagai pembandingan, penyemprotan kabut air pada minyak goreng dapat memberikan referensi analisis yang memudahkan dalam memahami fenomena yang terjadi.

Penetesanan droplet pada minyak goreng menghasilkan fenomena yang menarik dikarenakan temperatur minyak goreng yang jauh di atas temperatur didih droplet air. Akan ada suatu efek Leidenfrost yang mana droplet air tidak akan langsung mengalami evaporasi akibat adanya lapisan uap yang menyelimuti droplet. Sementara itu pada penyemprotan minyak goreng dengan menggunakan kabut air akan memberikan fenomena yang berbeda dimana efek cipratan dan letupan akan jauh berkurang serta letupan bisa terjadi akibat kontak antara zat cair dengan zat cair. Hal yang juga perlu diperhatikan adalah penetesanan droplet akan memberikan efek berupa fluktuasi temperatur sesaat setelah letupan. Setelah itu penurunan temperatur minyak goreng akan lebih cepat dibandingkan dengan tanpa adanya penetesanan.

### **Kata kunci :**

Kabut air, butir air, cipratan dan letupan, titik didih air, efek *Leidenfrost*

## ABSTRACT

Name : I GEDE WAHYU WIDIATMIKA ARIASA  
Study Program : MECHANICAL ENGINEERING  
Title : AN EXPERIMENTAL STUDY OF SPLASHING AND  
EXPLOSION PHENOMENA OF  
A HOT COOKING OIL RESULTED FROM  
IMPINGEMENT OF A WATER DROPLET

An experimental study of a water droplet impinging upon a pool of hot cooking oil below of auto ignition temperature has done to known splashing and explosion phenomena of a hot cooking oil and associated with cooking oil fire suppression method. Some factors that influence such as heigh of impinging droplet, droplet diameter, cooking oil temperature will give different phenomena especially for crater forming, splashing, intensity and the power of explosion and also the influence of cooking oil temperature fluctuation. For comparison, water mist suppression system for cooking oil can give analysis reference that make us easy to understand about the phenomena.

Water droplet impinging upon a pool of hot cooking oil give some interested phenomena because of the cooking oil temperature is higher than boiling temperature of water droplet. There are Leidenfrost effect that make surface of the water droplet completely covered by a vapor blanket, so that the water droplet slowly boil. In the mean time, for cooking oil water mist suppressing system resulted different phenomena for less splashing and explosion effect. The explosion can also happen in contact of liquid-liquid substance. We must also concern about the faster reduction of cooking oil temperature depend without impinging water droplet.

### **Key words:**

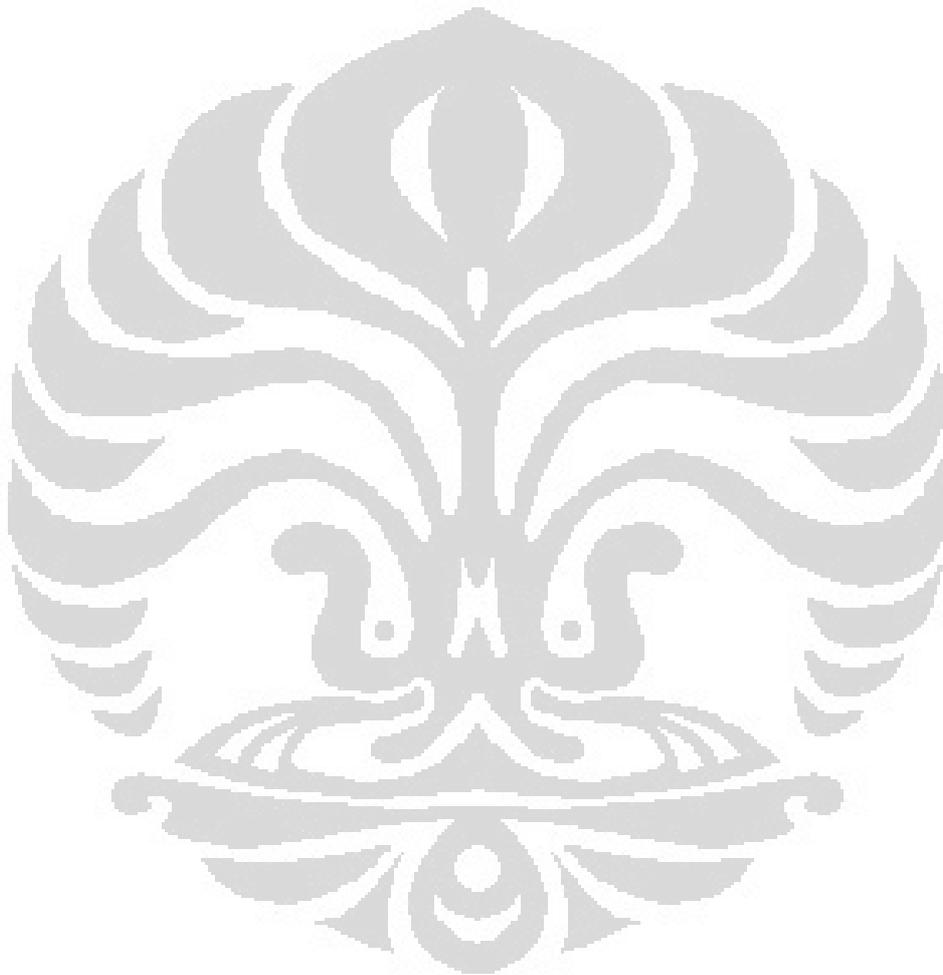
Water mist, water droplet, splashing and explosion, boiling temperature of water, *Leidenfrost* effect

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH .....	iv
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Pembatasan Masalah .....	3
1.5. Metodologi Penulisan .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1. Konsep Api .....	7
2.2. Cairan Mudah Terbakar ( <i>Combustible Liquid</i> ) .....	8
2.3. Minyak Goreng Sebagai Sumber Nyala Api .....	9
2.4. Karakteristik Api Dari Minyak Goreng .....	10
2.5. Penetasan Droplet Air Pada Suatu Media .....	12
2.6. Fenomena Cipratan Minyak Goreng Setelah Penetasan Droplet ...	15
2.7. Bilangan Tak Berdimensi Dalam Analisis Penetasan Droplet .....	20
2.8. Analisis Termodinamika Penetasan Droplet dan Kabut Air Pada Minyak Goreng .....	23
2.8.1 Diagram Properties Untuk Proses Perubahan Fase .....	23
2.8.2 Karakteristik Termodinamika Droplet Air dan Kabut Air Bila Diteteskan di Permukaan Panas .....	26
2.9. Metode Pendidihan ( <i>Boiling Mode</i> ) .....	29
2.9.1 Pendidihan Pool ( <i>Pool Boiling</i> ) .....	30
2.9.2 Efek <i>Leidenfrost</i> ( <i>Leidenfrost Effect</i> ) .....	33
<b>III. PERENCANAAN PENGUJIAN</b> .....	35
3.1. Konsep Perencanaan Pengujian Penetasan Droplet dan Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng .....	35
3.2. Konsep Perencanaan Pengujian Penetasan Droplet Guna Mencari Temperatur Kritis Minyak Goreng Untuk Terjadi Letupan	39
3.3. Konsep Perencanaan Pengujian Pengaruh Letupan Pada Minyak Goreng Terhadap Karakteristik Perubahan Temperatur Minyak Goreng .....	40
<b>IV. METODOLOGI PENGUJIAN</b> .....	42
4.1. Tujuan Pengujian .....	42

4.2. Komponen Pengujian .....	42
4.3. Instalasi Pengujian .....	48
4.4. Variasi Pengambilan Data .....	49
4.5. Prosedur Pengambilan Data .....	50
4.5.1 Prosedur Pengambilan Data Penetasan Droplet Pada Minyak Goreng .....	50
4.5.2 Prosedur Pengambilan Data Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng .....	52
4.5.3 Prosedur Pengambilan Data Pengujian Temperatur Kritis Minyak Goreng Untuk Terjadi Letupan .....	54
4.5.4 Prosedur Pengambilan Data Pengaruh Letupan Minyak Goreng Terhadap Perubahan Karakteristik Temperatur ...	55
<b>V. HASIL DAN ANALISIS .....</b>	<b>57</b>
5.1. Hasil dan Analisis Pengujian Penetasan Droplet Air dan Kabut Air Pada Minyak Goreng .....	57
5.1.1 Hasil Pengujian Penetasan Droplet Air Pada Minyak Goreng .....	58
5.1.1.1 Hasil Pengujian Pada Ketinggian Jatuh Droplet Air 10 cm.....	58
5.1.1.2 Hasil Pengujian Pada Ketinggian Jatuh Droplet Air 20 cm.....	59
5.1.1.3 Hasil Pengujian Pada Ketinggian Jatuh Droplet Air 30 cm.....	61
5.1.2 Hasil Pengujian Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng Sawit .....	63
5.1.2.1 Pengujian Pada Minyak Goreng Sawit.....	64
5.1.3 Analisis Penetasan Droplet Air dan Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng .....	65
5.1.3.1 Pengaruh <i>Webber Number</i> Dalam Pengujian Penetasan Droplet dan Kabut Air Pada Minyak Goreng.....	66
5.1.3.2 Peningkatan Volume Droplet Air Sebelum Letupan.....	69
5.1.3.3 Efek Leidenfrost Pada Penetasan Droplet Di Atas Permukaan Minyak Goreng.....	72
5.1.3.4 Pengaruh Tegangan Permukaan ( <i>Surface Tension</i> ) Minyak Goreng Dalam Pengujian Penetasan Droplet dan Kabut Air Pada Minyak Goreng.....	73
5.1.3.5 Analisis Terjadinya Kawah, Cipratan Serta Letupan Minyak Goreng Saat Penetasan Droplet Air.....	74
5.2. Hasil dan Analisis Pengujian Temperatur Kritis Minyak Goreng Untuk Menjadi Letupan .....	82
5.3. Hasil dan Analisis Pengaruh Letupan Minyak Goreng Terhadap Perubahan Karakteristik Temperatur.....	83
5.3.1 Karakteristik Perubahan Temperatur Minyak Jagung Saat Penetasan Droplet .....	83

<b>V. KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	90
6.1. Kesimpulan .....	90
6.2. Saran .....	91
<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	92
<b>LAMPIRAN</b> .....	97

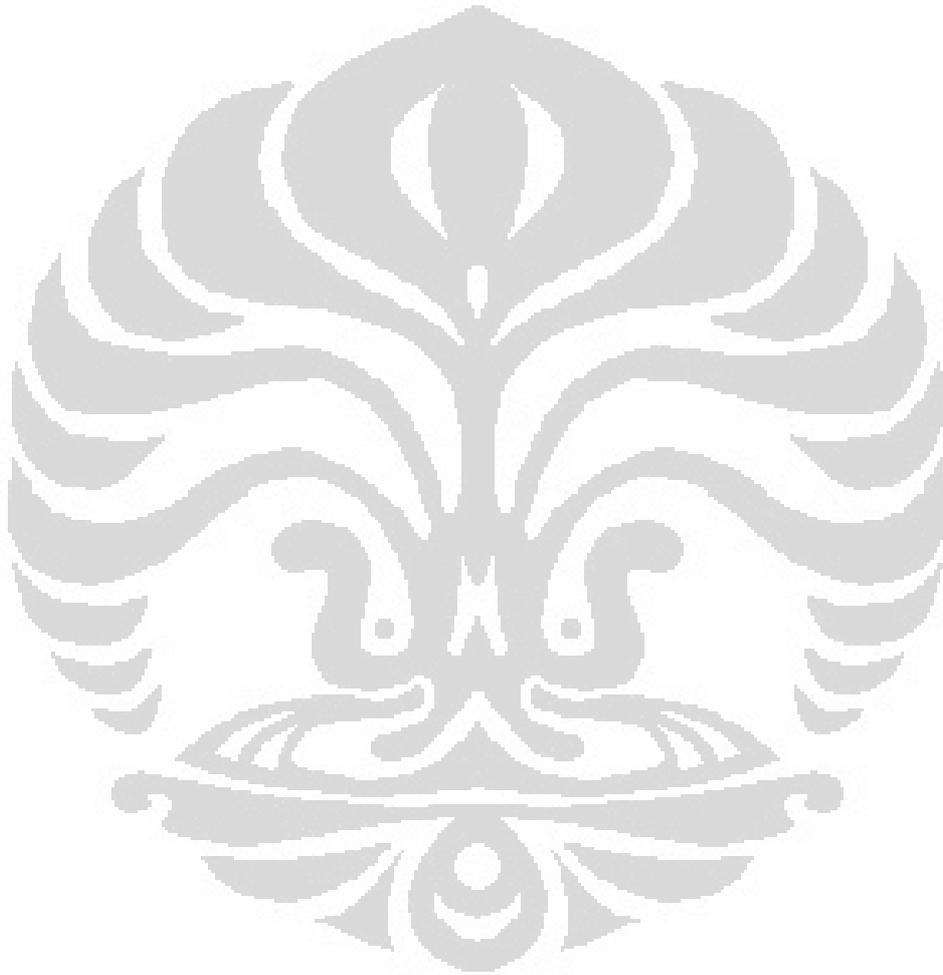


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen segitiga api .....	7
Gambar 2.2	Panas memungkinkan nyala api berlangsung kontinyi .....	8
Gambar 2.3	Kawah dan kolom pantulan yang terjadi saat droplet susu diteteskan pada air .....	14
Gambar 2.4	Angka <i>Webber</i> kritis agar terjadi cipratan pada cairan sebagai fungsi dari temperatur .....	16
Gambar 2.5	Kedalaman penetrasi sebagai fungsi dari temperatur pada nilai <i>Webber</i> yang tetap .....	17
Gambar 2.6	Tegangan permukaan air pada beberapa temperatur .....	21
Gambar 2.7	<i>T-v</i> diagram untuk proses pemanasan air pada tekanan konstan (1 atm) .....	23
Gambar 2.8	<i>T-v</i> diagram untuk air murni pada tekanan konstan pada beberapa variasi tekanan .....	24
Gambar 2.9	<i>T-v</i> diagram dari zat murni .....	25
Gambar 2.10	<i>P-v</i> diagram dari zat murni .....	26
Gambar 2.11	Kabut air saat menumbuk permukaan minyak goreng .....	27
Gambar 2.12	Droplet air saat menumbuk permukaan minyak goreng .....	27
Gambar 2.13	Percampuran antara droplet dengan minyak goreng .....	28
Gambar 2.14	Cipratan pada minyak goreng akibat dari ledakan pada droplet .....	28
Gambar 2.15	Grafik pendidihan air pada tekanan 1 atm .....	31
Gambar 2.16	Droplet air yang diselimuti oleh lapisan uap ( <i>layer of vapor</i> ) .....	33
Gambar 3.1	Pemanas elektrik yang dikontrol oleh <i>temperature controller</i>	36
Gambar 3.2	Jarum suntik yang diikatkan pada pipa yang dapat diatur ketinggiannya .....	36
Gambar 3.3	Nozel kabut air yang diikatkan pada pipa yang dapat diatur ketinggiannya .....	37
Gambar 3.4	Dua buah termokopel yang dihubungkan ke <i>temperature controller</i> dan data akuisisi .....	37
Gambar 3.5	Penempatan alat pengujian dalam kabinet yang dibatasi <i>acrylic</i> .....	37
Gambar 3.6	Penempatan <i>High Speed Video Camera</i> dan sistem pencahayaan .....	38
Gambar 3.7	Skema pengujian penetasan droplet dan kabut air pada minyak goreng .....	38
Gambar 3.8	Perencanaan pengujian penetasan droplet dan kabut air pada permukaan minyak goreng .....	39
Gambar 3.9	Jarum suntik yang diikatkan pada pipa dengan ketinggian 20 cm dari permukaan minyak goreng .....	40
Gambar 4.1	Jenis minyak goreng yang digunakan dalam pengujian .....	43
Gambar 4.2	Gelas <i>pyrex</i> yang diletakkan di atas pemanas elektrik .....	43
Gambar 4.3	Pemanas elektrik ( <i>heater</i> ) untuk memanaskan minyak goreng .....	43
Gambar 4.4	<i>Temperature controller</i> .....	44
Gambar 4.5	Termokopel .....	44

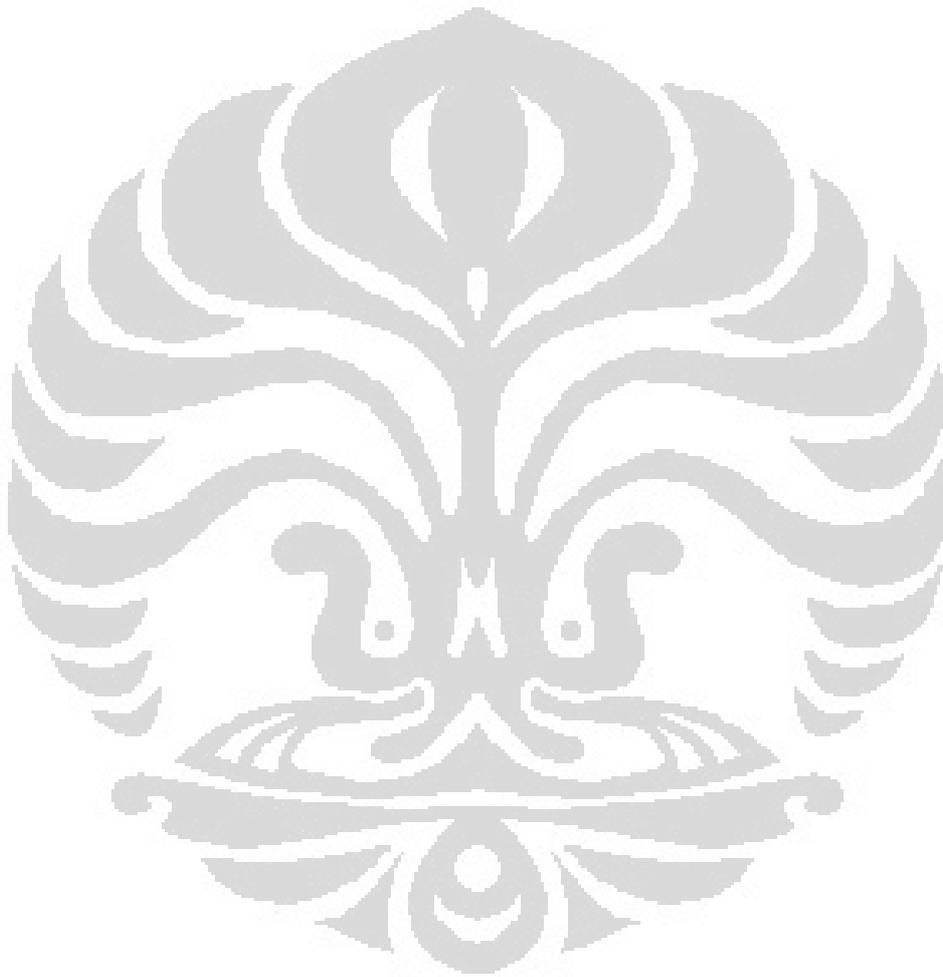
Gambar 4.6 Data akuisisi ( <i>data logger</i> ) .....	45
Gambar 4.7 <i>High Speed Video camera</i> .....	46
Gambar 4.8 Jarum suntik .....	46
Gambar 4.9 Tabung nitrogen dan <i>Pressure Regulator</i> .....	46
Gambar 4.10 <i>Pressure vessel</i> .....	47
Gambar 4.11 Nozel <i>greenhouse</i> .....	47
Gambar 4.12 Pipa dan <i>Pressure gauge</i> yang digunakan .....	48
Gambar 4.13 Skema pengambilan data pengujian .....	48
Gambar 4.14 Foto pengambilan data penetesan droplet pada minyak goreng .....	51
Gambar 4.15 Foto pengambilan data penyemprotan kabut air pada minyak goreng .....	53
Gambar 5.1 Gambar <i>sequence</i> dari penetesan droplet air diameter 2 mm, ketinggian 10 cm pada minyak sawit volume 30 mL dan temperatur 220 <sup>0</sup> C .....	58
Gambar 5.2 Gambar <i>sequence</i> dari penetesan droplet air diameter 2 mm, ketinggian 20 cm pada minyak sawit volume 30 mL dan temperatur 220 <sup>0</sup> C .....	60
Gambar 5.3 Gambar <i>sequence</i> dari penetesan droplet air diameter 2 mm, ketinggian 30 cm pada minyak sawit volume 30 mL dan temperatur 220 <sup>0</sup> C .....	62
Gambar 5.4 Gambar <i>sequence</i> dari penyemprotan kabut air dari nozel diameter 0,3 mm, tekanan sistem 400 psi, ketinggian 20 cm pada minyak sawit volume 30 mL dan temperatur 220 <sup>0</sup> C.....	64
Gambar 5.5 Perbandingan diameter gelas dengan diameter droplet secara visual pada laptop .....	67
Gambar 5.6 <i>Sequence</i> gambar droplet saat akan meledak .....	69
Gambar 5.7 Kenaikan volume droplet saat terjadi letupan .....	70
Gambar 5.8 Perubahan volume droplet saat terjadi letupan .....	71
Gambar 5.9 <i>Sequence</i> gambar saat gelas terangkat pada ketinggian maksimal .....	71
Gambar 5.10 Tegangan permukaan pada berbagai jenis minyak goreng ...	73
Gambar 5.11 Kawah yang terbentuk setelah droplet menumbuk permukaan minyak goreng .....	74
Gambar 5.12 Cipratan yang terbentuk setelah droplet menumbuk permukaan minyak goreng .....	75
Gambar 5.13 Pecahan droplet yang terbentuk setelah droplet menumbuk permukaan minyak goreng .....	76
Gambar 5.14 Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur 210 <sup>0</sup> C .....	84
Gambar 5.15 Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur 190 <sup>0</sup> C .....	84
Gambar 5.16 Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur 170 <sup>0</sup> C .....	85
Gambar 5.17 Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur 150 <sup>0</sup> C .....	85
Gambar 5.18 Grafik temperatur dan waktu dengan penetesan dan tanpa penetesan droplet pada temp. 210 <sup>0</sup> C minyak kelapa .....	86

Gambar 5.19 Grafik temperatur dan waktu dengan penetasan dan tanpa penetasan droplet pada temp. 190 <sup>0</sup> C minyak kelapa .....	87
Gambar 5.20 Grafik temperatur dan waktu dengan penetasan dan tanpa penetasan droplet pada temp. 170 <sup>0</sup> C minyak kelapa .....	87
Gambar 5.21 Grafik temperatur dan waktu dengan penetasan dan tanpa penetasan droplet pada temp. 150 <sup>0</sup> C minyak kelapa .....	88
Gambar 5.22 Karakteristik penurunan temperatur pada permukaan padat dengan penyemprotan dan tanpa penyemprotan droplet...	88
Gambar 5.23 Perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) antara saat penetasan droplet dengan 50 detik setelahnya pada berbagai temperatur pengujian.....	89



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Titik nyala dari beberapa jenis cairan golongan IIIB .....	9
Tabel 5.1 Karakteristik letupan berbagai jenis minyak goreng pada penetesannya droplet air .....	81
Tabel 5.1 Data pengujian temperatur kritis pada penetesannya droplet dengan ketinggian 20 cm pada berbagai jenis minyak goreng...	82



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu aktifitas utama yang dilakukan di dapur rumah tangga, hotel, restoran ataupun di *outlet* makanan cepat saji adalah kegiatan yang berhubungan dengan menggoreng. Menggoreng sudah merupakan salah satu kegiatan yang lumrah dilakukan untuk saat ini seiring dengan perkembangan jenis makanan dan teknologi pengolahan makanan. Salah satu komponen utama dalam kegiatan menggoreng adalah minyak goreng yang digunakan. Di pasaran terdapat beberapa jenis minyak goreng, yang membedakan adalah terutama dalam hal properties kimiawinya. Walaupun memiliki properties kimiawi yang berbeda-beda, akan tetapi jika dipanaskan, secara umum fenomenanya akan sama, sehingga bahaya yang ditimbulkan serta penanganannya pun akan sama pula

Secara struktur kimiawi pembentuknya, minyak goreng adalah berasal dari *hidrokarbon* atau lebih tepatnya campuran dari ester asam lemak dengan *gliserol*[28]. Akibatnya, api yang ditimbulkan minyak goreng akan lebih sulit dipadamkan dibandingkan dengan jenis api terbakar bahan cair lainnya[21,22]. Jika kita memanaskan minyak goreng, maka fenomena yang terjadi pertama kali adalah munculnya asap dari permukaan minyak goreng yang disebut dengan *smoke point* (titik asap). Apabila minyak goreng terus dipanaskan maka akan mencapai temperatur *flash point* nya yang mana akan mudah terbakar sendiri jika disulut api. Hingga akhirnya api akan muncul dengan sendirinya di permukaan minyak goreng, dan saat fase inilah disebut dikatakan mencapai temperatur *auto ignition*.

Efektifitas penerapan sistem pemadam api adalah aspek penting dalam desain keselamatan kebakaran, khususnya pada kebakaran yang timbul di dapur. Kelemahan berupa penggunaan air yang berlebihan pada sistem *sprinkler* air dan pelarangan penggunaan *Halon 1301* mengharuskan untuk dilakukan penelitian

lebih lanjut guna mencari sistem perlindungan alternatif dalam mengontrol kebakaran itu. Salah satu yang sudah dikembangkan untuk mengontrol kebakaran adalah dengan menggunakan metode semprotan kabut air (*water mist spray*). Jika dibandingkan dengan sistem universal (semprotan *sprinkler*), maka sistem semprotan kabut air ini memberikan luas area permukaan kontak yang lebih besar meskipun dengan jumlah air yang sama, yang menyebabkan lebih cepat terjadinya evaporasi dan penyerapan panas dari api yang lebih efektif. Uap kabut tersebut akan memecah konsentrasi dari oksigen sebaik proses pirolisis uap bahan bakar, sehingga akan memperlambat pembakaran. Kabut air juga bisa memblokir panas radiasi dan memperlambat proses pembakaran pada benda yang mudah terbakar dalam rumah tangga. Selain itu, penggunaan air dalam jumlah yang sedikit dan ukuran droplet yang lebih kecil (kabut) akan sangat berguna pada keadaan dimana air dapat merusak peralatan dan temperatur minyak goreng yang sangat tinggi[23]. Efek cipratan dan letupan yang ditimbulkan tentunya akan sangat berbahaya jika kita tidak menyadarinya.

Percobaan kali ini merupakan pengembangan dari percobaan sebelumnya yang mencari kemungkinan untuk mengaplikasikan sistem kabut air untuk pemadaman api yang bersumber dari minyak goreng. Sehingga pada akhirnya didapatkan perbedaan fenomena karakteristik minyak goreng apabila diteteskan dengan satu tetesan air (*single droplet*) atau disemprotkan kabut air (*water mist spray*) dimana kedua percobaan itu diberikan perlakuan yang sama dengan menjatuhkannya di atas genangan (*pool*) minyak goreng yang panas. Tetesan air digunakan untuk memahami fenomena semprotan air yang lebih kompleks. Sesuai dengan momentum tumbukan dari semprotan kabut air yang lebih kecil daripada tetesan air, maka diperkirakan akan terjadi perbedaan dalam hal tumbukan terhadap permukaan minyak goreng panas itu. Efeknya tentu saja terhadap karakteristik letupan atau ledakan yang dihasilkan diantara keduanya.

## 1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini adalah kelanjutan dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang mencari efektifitas pemadaman api minyak goreng dengan menggunakan sistem penyemprot kabut air. Dalam penelitian ini akan mencoba untuk lebih memahami fenomena percikan dan letupan yang terjadi pada minyak goreng saat disemprotkan dengan kabut air. Dan sebagai pendekatan utama dalam memahaminya adalah dengan meneteskan satu butir atau droplet air ke dalam minyak goreng tersebut. Dengan demikian fenomena yang terjadi setelahnya akan lebih mudah untuk diamati dan dijelaskan karakteristiknya dalam tiap-tiap pengujian.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan, yaitu :

1. Mengetahui dan memahami fenomena letupan yang terjadi jika minyak goreng dengan temperatur di bawah temperatur nyalanya (*flash point*) diteteskan dengan satu tetes droplet.
2. Mengetahui dan memahami fenomena letupan yang terjadi jika minyak goreng dengan temperatur di bawah temperatur nyalanya (*flash point*) disemprotkan dengan kabut air.
3. Mengetahui temperatur kritis pada berbagai jenis minyak goreng untuk terjadi letupan atau ledakan.
4. Mengetahui dan memahami pengaruh letupan dalam minyak goreng setelah penetesan satu droplet air terhadap karakteristik perubahan temperatur minyak goreng serta fenomena yang terjadi selama proses peletupan tersebut.

## 1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi :

1. Digunakan tiga jenis minyak goreng yang dibeli secara acak di pasaran dari tiga merk yang berbeda.
2. Pemanasan menggunakan pemanas elektrik biasa, hanya ditambahkan *temperature controler* sebagai pemantau dan pengatur temperatur minyak gorengnya.
3. Nosel yang digunakan pada sistem kabut air adalah nosel dengan merek *Mist Nozzle* APO TW-3. Tekanan yang digunakan, sudut bukaan nosel dan ukuran droplet yang dihasilkan mengacu kepada spesifikasi manufaktur yang di keluarkan oleh supplier *Mist Nozzle* APO TW-3.
4. Droplet dihasilkan dengan menggunakan jarum suntik manual.
5. Droplet diasumsikan berbentuk seperti bola.
6. Ukuran droplet, besarnya *flow rate* dan *pressure* yang dihasilkan oleh nosel tidak diukur pada penelitian ini.
7. Tidak dilakukan perhitungan terhadap *flow rate* dan *pressure drop* dari *piping system*.
8. Temperatur diukur dengan menggunakan termokopel type-K.
9. Gambar diasumsikan dua dimensi, sehingga fenomena yang terjadi di dalam gelas dianggap dalam satu garis.

## 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

### 1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses pembelajaran bahan-bahan yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku ajar, jurnal, skripsi dengan tema yang bersesuaian serta dari situs-situs di internet.

### 2. Perancangan sistem pengujian

Perancangan sistem pengujian ini sangat sederhana karena hanya membutuhkan pemanas elektrik, jarum suntik manual dan gelas *pyrex* yang diatur sedemikian rupa. Untuk sumber kabut air dihasilkan dari alat uji yang telah dibuat pada eksperiment sebelumnya.

3. Pengujian penetasan droplet air dan penyemprotan kabut air  
Melakukan pengujian atau pengambilan data sesuai dengan prosedur percobaan yang telah ditentukan sebelumnya
4. Analisis dan Kesimpulan Hasil Pengujian  
Setelah data diolah maka dilakukan proses analisis terhadap gambar dan grafik yang diperoleh. Dari analisis tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian. Analisis dilakukan dengan mengacu kepada literatur yang telah ada.
5. Membuat kesimpulan akhir dari seluruh kegiatan penelitian. Kesimpulan yang dibuat mengacu pada tujuan dari penelitian ini.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan skripsi ini dilakukan menurut urutan sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bagian ini berisi latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini dan perkembangan. Dasar teori yang terdapat dalam penelitian ini yaitu mengenai minyak goreng sebagai sumber api, karakteristik minyak goreng, fenomena letupan minyak goreng saat droplet air yang diteteskan pada suatu cairan panas, dll. Tinjauan pustaka ini diambil dari beberapa buku, jurnal dan situs-situs internet.

### **BAB III PROSES PERANCANGAN DAN PEMBUATAN**

Bab ini berisi penjelasan secara lengkap tentang konsep perancangan pengujian, yang meliputi persiapan alat dan perakitan alat uji.

#### **BAB IV METODOLOGI PENGUJIAN**

Bab ini menerangkan tentang bagaimana instalasi pengujian dilakukan, komponen yang digunakan dalam pengujian, prosedur dan metode pengujian.

#### **BAB V HASIL DAN ANALISIS**

Bab ini memuat data-data hasil pengujian yang diolah menjadi data berupa grafik, foto dan penjelasan mengenai analisis terhadap kinerja sistem kabut air dan fenomena penetasan droplet air pada minyak goreng. Dan selanjutnya data ini akan dianalisis dan dicari korelasi fenomenanya dengan materi pada literatur yang tersedia.

#### **BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bagian ini akan diambil beberapa kesimpulan dari seluruh analisis yang telah dilakukan dengan disertai saran terhadap pengembangan penelitian selanjutnya.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 1.7 Konsep Api

Api muncul akibat proses oksidasi yang terjadi secara cepat pada pembakaran material atau bahan bakar, yang disertai dengan munculnya panas (kalor), asap, cahaya (nyala api) dan gas sisa hasil pembakaran seperti karbon dioksida dan air. Ketiga elemen tersebut (bahan bakar, oksigen dan panas) disebut dengan segitiga api. Api akan padam ketika salah satu bagian dari segitiga api dihilangkan atau kesetimbangan reaksinya mulai tidak seimbang[7].

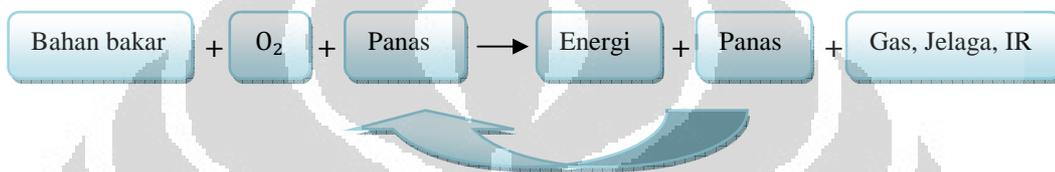


**Gambar 2.1** Komponen segitiga api

Pembakaran merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidan yang menghasilkan energi panas. Bahan bakar dapat terbakar dan mengalami reaksi pembakaran jika berada dalam fase gas, oleh karena itu bahan bakar yang berada dalam bentuk fase awal selain gas (padat dan cair) harus mengalami perubahan bentuk menjadi fase gas sebelum dapat terbakar. Untuk bahan bakar cair, proses tersebut dapat dilakukan dengan cara menguapkan bahan bakar tersebut. Bahan bakar padat sebelum dapat terbakar perlu dilakukan dekomposisi secara kimiawi yang disebut *pyrolysis* untuk menghasilkan produk yang berat molekulnya cukup ringan sehingga dapat menguap dan terbakar. Sedangkan untuk oksidannya adalah

zat yang mengandung oksigen (misalnya udara bebas) yang dapat bereaksi dengan bahan bakar.

Nyala api adalah sebuah hasil reaksi eksotermis, suatu reaksi oksidasi kimia yang melepaskan panas serta menghasilkan energi dan gas yang berpedar yang terdiri dari gas yang bereaksi, pancaran padat yang terlihat dan sinar infra merah. Nyala api juga bergantung kepada pasokan oksigennya. Karena proses pembakaran merupakan reaksi eksotermis, yang menghasilkan panas maka memungkinkan reaksi nyala akan berlangsung kontinyu (selama bahan bakar belum habis).



**Gambar 2.2** Panas memungkinkan nyala api berlangsung kontinyu[7]

Warna api dipengaruhi oleh intensitas cahayanya dan biasanya digunakan untuk menentukan apakah suatu bahan bakar termasuk dalam tingkatan kombusi sehingga dapat digunakan untuk keperluan manusia seperti digunakan sebagai bahan bakar api unggun, perapian dan kompor gas atau tingkat pembakar yang keras yang bersifat sangat penghancur, membakar dengan tak terkendali sehingga merugikan manusia, misalnya : kebakaran pada gedung, hutan dan sebagainya.

### 1.8 Cairan Mudah Terbakar (*Combustible Liquid*)

Sistem penyemprot air (*Water Spray System*) sudah secara luas digunakan sebagai pemadam sumber api (*pool fire*), khususnya pada cairan yang mudah terbakar (*combustible liquid*). Cairan yang mudah terbakar disini didefinisikan sebagai cairan yang memiliki titik nyala di atas 37,8<sup>0</sup>C saat diuji pada gelas tertutup. Cairan-cairan ini diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu [2] :

- Golongan II

- Golongan IIIA
- Golongan IIIB

Cairan golongan II didefinisikan sebagai cairan yang memiliki titik nyala diantara temperatur  $37,8^{\circ}\text{C}$  hingga  $60^{\circ}\text{C}$ . Cairan golongan IIIA didefinisikan sebagai cairan yang memiliki titik nyala diantara temperatur  $60^{\circ}\text{C}$  hingga  $93^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan cairan golongan IIIB adalah cairan yang memiliki titik nyala di atas  $93^{\circ}\text{C}$ . Dalam Tugas Akhir ini digunakan cairan golongan IIIB ini, yaitu minyak goreng. Contoh lain dari cairan golongan IIIB ini adalah minyak pelumas, *transformer oil*, minyak sisa bahan bakar dan beberapa minyak yang digunakan dalam industri kimia. Adapun nilai titik nyala dari beberapa cairan tersebut adalah dapat dilihat dalam tabel 2.1 berikut :

**Tabel 2.1** Titik nyala dari beberapa jenis cairan golongan IIIB

Jenis Cairan	<i>Transformer Oil</i> [3]	Minyak Goreng [4]	Asam Lemak [5]	Minyak Seal [6]
Titik Nyala ( $^{\circ}\text{C}$ )	146 – 300	282	138 – 204	137

### 1.9 Minyak Goreng Sebagai Sumber Nyala Api

Minyak adalah senyawa yang berbentuk cairan pekat pada suhu ruangan ( $25^{\circ}\text{C}$ ) dan tidak larut dalam air. Berdasarkan sumbernya, minyak dibagi menjadi dua macam, yaitu minyak bumi (*mineral oils* atau *petroleum*) dan minyak dari makhluk hidup (*lipida* atau *lipids*). Adapun minyak dari makhluk hidup terbagi lagi menjadi minyak nabati (*vegetable oils*) dan minyak hewani (*animal oils*). Minyak hewani lebih populer disebut dengan istilah lemak (*fats*) karena pada umumnya berbentuk padat pada suhu ruangan ( $25^{\circ}\text{C}$ ).

Minyak nabati merupakan hasil akhir (*refined oils*) lemak murni dari tumbuhan yang telah mengalami proses penyulingan, dimana pada suhu ruangan berbentuk cairan. Berdasarkan kegunaannya, minyak nabati terbagi menjadi dua golongan. Pertama, minyak nabati yang dapat digunakan dalam industri makanan

(*edible oils*) dan dikenal dengan nama minyak goreng meliputi minyak kelapa, minyak kelapa sawit, minyak zaitun, minyak kedelai, minyak kanola dan sebagainya. Golongan kedua adalah minyak yang digunakan dalam industri non makanan (*non edible oils*) misalnya minyak kayu putih, dan minyak jarak.

Pada suhu ruangan minyak goreng akan berbentuk cairan, jika dipanaskan akan merubah karakteristik dari minyak goreng tersebut. Beberapa karakteristik yang perlu di ketahui mengenai temperatur minyak goreng adalah :

1. Titik asap (*Smoke point*) pada minyak goreng adalah temperatur dimana struktur kimia dari minyak mulai mengurai menjadi gliserol dan asam lemak bebas dan ditandai dengan munculnya asap. Minyak yang sudah timbul asap pada saat dipanaskan mengindikasikan akan terjadinya pembakaran minyak goreng. Temperatur smoke point kira-kira berkisar antara 220<sup>0</sup>C hingga 240<sup>0</sup>C
2. *Flash point* minyak goreng adalah temperatur terendah minyak goreng agar dapat menguap untuk membentuk campuran yang bisa terbakar di udara jika disulut dengan api. Untuk temperatur *flash point* pada beberapa jenis minyak goreng dapat dilihat pada tabel 2.1.
3. Temperatur *Auto ignition* atau disebut juga sebagai *fire point* adalah temperatur dimana uap minyak goreng terbakar secara spontan, tanpa membutuhkan sumber luar untuk menyalakan api pada tekanan normal (atmosfir). Temperatur *auto ignition* dari minyak goreng berkisar dari 350<sup>0</sup>C hingga 370<sup>0</sup>C[7].

Jenis minyak goreng yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah minyak goreng nabati yang diolah dari kelapa sawit (*palm oil*), jagung (*corn oil*) dan kelapa (*cocunut oil*).

### 1.10 Karakteristik Api Dari Minyak Goreng

Minyak goreng sebagai salah satu sumber api dapat terjadi saat kita menggoreng. Ledakan dari uap minyak dapat terjadi di permukaan kolam api

(*pool fire*) ataupun pada saluran *ducting*[1]. Hal ini disebabkan karena minyak goreng dipanaskan hingga mendekati temperatur nyalanya, dan banyak dari uap minyak goreng yang terjebak di dalam saluran *ducting* pada temperatur yang tinggi. Sehingga pemanasan yang terus menerus dari sumber api akan menjadi pemicu nyala api pada permukaan minyak ataupun pada saluran *ducting* tersebut.

Mekanisme pemadaman api yang bersumber dari minyak goreng yang dipanaskan tergantung dari perpindahan panas antara droplet air atau kabut air dengan cairan di sekitar kolam api (*pool fire*), penguapan air di permukaan minyak, penguapan dari pendidihan air atau droplet dan percikan minyak yang terjadi. Semakin tinggi nilai perpindahan panas yang terjadi maka akan semakin meningkatkan kemampuan pemadaman dari droplet air tersebut. Saat droplet menguap pada permukaan minyak goreng, dia akan menyerap panas sehingga akan mempercepat proses pemadaman. Penguapan dari pendidihan droplet akan menambah jumlah panas yang bisa dihilangkan dari minyak goreng, karena proses pendidihan tersebut akan mengambil panas atau energi dari panas minyak goreng, sehingga akan menurunkan temperatur minyak goreng. Tetapi proses ini juga mengakibatkan percikan pada permukaan minyak goreng yang akan berakibat menambah intensitas api tersebut. Sehingga dalam perencanaan suatu mekanisme pemadaman api minyak goreng akan tergantung pada : massa jenis (*density*) minyak goreng, kekentalan (*viscosity*) minyak goreng, tegangan permukaan minyak goreng, kecepatan droplet saat menuju permukaan minyak, ukuran droplet yang digunakan dan jumlah *flux* kabut air yang digunakan (jika menggunakan sistem pemadaman kabut air).

Pemadaman api yang bersumber dari minyak goreng tidak disarankan menggunakan droplet yang memiliki diameter relatif besar seperti pada sistem pemadam api biasa (*sprinkler*) karena akan menimbulkan efek berupa ledakan- ledakan yang berbahaya dan menimbulkan buih-buih panas pada permukaan minyak goreng. Pada percobaan sebelumnya, telah terbukti bahwa penggunaan sistem mekanisme kabut air ini akan mengurangi efek dari ledakan pada permukaan minyak goreng dan terbukti lebih efektif dalam memadamkan api

karena ukuran kabut air yang jauh lebih kecil dari droplet, sehingga akan memungkinkan jumlah kabut air yang lebih banyak yang pada akhirnya akan memiliki luas permukaan perpindahan panas yang lebih besar. Dengan demikian suatu mekanisme pengurangan panas api minyak goreng akan terjadi sehingga pemadaman akan lebih efektif.

### 1.11 Penetesan Droplet Air Pada Suatu Media

Penelitian mengenai interaksi antara droplet air dengan berbagai jenis permukaan telah dilakukan sejak 100 tahun yang lalu. Aplikasi dari fenomena penetesan ini adalah seperti pada pendinginan dengan kabut air daripada baling-baling turbin, peralatan elektronik dan mesin pembakaran dalam. Hal yang perlu diperhatikan dalam interaksi ini adalah jenis dari permukaan tumbuk atau *impact* nya. Permukaan tumbuk disini bisa berupa permukaan padat atau cair. Perbedaan jenis permukaan tumbuk akan menyebabkan perbedaan fenomena dinamik setelah tumbukan baik pada droplet nya ataupun pada permukaan tumbuknya.

Saat droplet ditetaskan ke suatu media, maka dia akan memiliki suatu energi, yang disebut energi kinetik. Sebelum menetes, droplet yang berada di ujung jarum memiliki energi potensial. Saat menumbuk permukaan media (minyak goreng) maka droplet tersebut memiliki energi kinetik yang maksimal. Adapun perumusannya dapat diketahui sebagai berikut [27]:

$$E_p = E_k$$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.1)$$

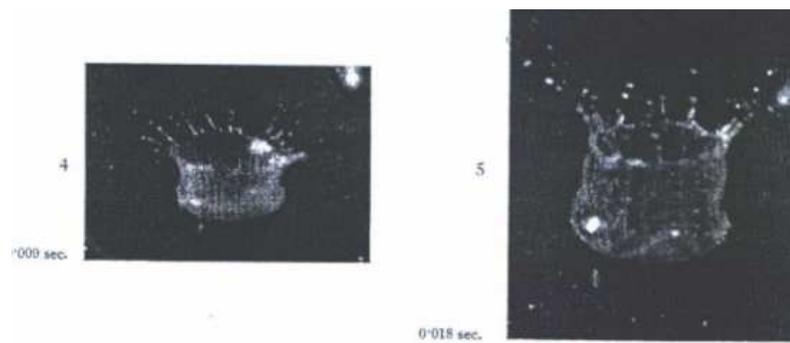
Secara umum, setelah droplet menumbuk atau *impact* dengan permukaan cair, droplet akan mengambang, memantul, bersatu ataupun akan terjadi cipratan pada permukaan cairan. Dalam hal ini, *Rodriguez* dan *Mesler*[9] telah menggambarkan proses penggabungan ataupun cipratan yang terjadi setelah droplet air menumbuk kolam air, yang mana menghasilkan bentuk jet yang disebut sebagai percikan dan juga menyebabkan bentuk cincin pusar yang disebut

sebagai fenomena penggabungan droplet. Mereka mendefinisikan suatu area atau regime tersebut yang dipengaruhi oleh bilangan *Froude* ( $Fr$ ) dan bilangan *Reynold* ( $Re$ ). Untuk bilangan *Reynold* yang lebih besar dari 3000 dan untuk bilangan *Froude* antara 6 hingga 18, tumbukan droplet air dengan permukaan cairan akan menghasilkan cipratan.

*Hsaio et al.*[10] berdalil bahwa penyebaran formasi pusaran (*vortex*) saat cipratan dipengaruhi oleh suatu bilangan *Webber* ( $We$ ). Dia mendefinisikan bahwa bilangan *Webber* adalah perbandingan antara energi permukaan per satuan waktu terhadap perpindahan panas konveksi per satuan waktu. Data yang diperoleh diplot sebagai data penghubung dengan data yang diperoleh dari eksperimen yang telah dilakukan oleh *Chapman* dan *Crichlow*[11], *Rodriguez* dan *Mesler*[9] serta *Thompson* dan *Newell*[12]. Untuk menguji hipotesisnya, *Hsaio* melakukannya dengan droplet mercury yang ditumbukkan juga pada *pool* mercury. Dia menyatakan bahwa ketika memplot bilangan *Webber* sebagai fungsi dari bilangan *Froude*, nilai kritis bilangan *Webber* sebesar 8 menyebabkan formasi *vortex* dari cipratan. Berdasarkan penelitiannya, bahwa bilangan *Webber* nilainya tidak tergantung dari bilangan *Froude*.

*Rein*[13] melanjutkan percobaan yang dilakukan oleh *Rodriguez* dan *Mesler*[9] dengan mengamati daerah transisi untuk penggabungan dan cipratan dari droplet air pada kolam air. Dia menemukan bahwa bilangan *Webber* adalah parameter utama yang mempengaruhi nilai transisi dari untuk penggabungan ataupun cipratan droplet air tersebut. Sejak bilangan *Webber* meningkat, maka suatu jet teramati akan timbul menuju permukaannya.

Percobaan penetasan droplet pada permukaan air lainnya juga pernah dilakukan oleh *Worthington*[14] dengan mengamati fenomena cipratan yang terjadi dan mencoba untuk menggambarannya. Dia menggunakan suatu droplet susu dan meneteskannya pada air. Dia menyimpulkan bahwa droplet tersebut akan membentuk suatu lembah yang berbentuk seperti mahkota dan suatu kolom pantulan seperti yang terlihat pada gambar 2.3 berikut[1].



**Gambar 2.3** Kawah dan kolom pantulan yang terjadi saat droplet susu diteteskan pada air

*Wachters, et al.*[15] melakukan analisis tumbukan penetesan droplet pada beberapa cairan droplet dengan kisaran diameter 2 mm hingga 3 mm pada permukaan padat yang memiliki temperatur sekitar 400°C. Dia menyimpulkan suatu parameter berupa satu bilangan tak berdimensi yaitu bilangan *Webber* untuk menggambarkan proses kehancuran droplet setelah tumbukan. Untuk droplet dengan  $We < 30$  tidak terjadi cipratan, droplet dengan kisaran  $30 < We < 80$  maka droplet akan terpecah setelah memantul pada dinding dan pada  $We > 80$  maka akan terjadi cipratan.

*Bernardin*[16] mengatakan bahwa kecepatan droplet dan temperatur permukaan adalah dua parameter penting yang mempengaruhi karakteristik dari tumbukan yang terjadi. Dia mengamati droplet air yang menumbuk pada permukaan yang dilapisi (*polished*) dan mendefinisikan empat daerah perpindahan panas yang jelas dari kurva pendidihan, yaitu : daerah fase tunggal, daerah pendidihan *nucleate*, daerah pendidihan transisi dan daerah pendidihan film atau lapisan.

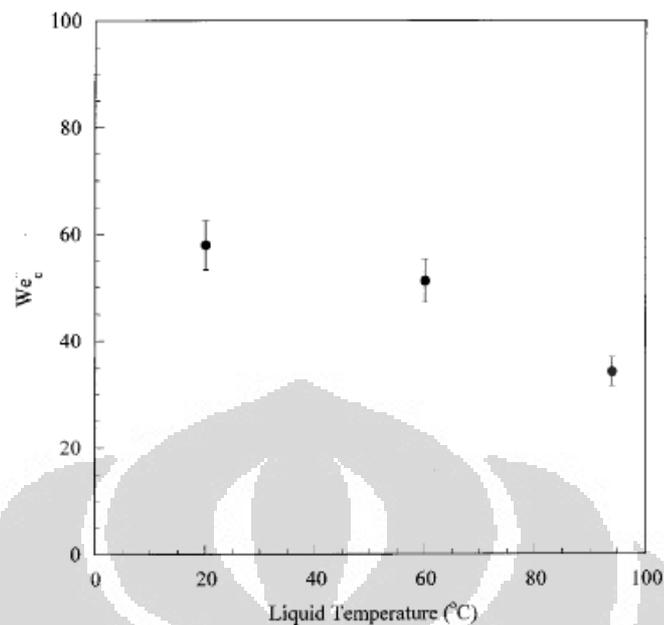
Percobaan lainnya telah banyak dilakukan sebelumnya, akan tetapi sebagian besar hanya memfokuskan pada tumbukan droplet pada permukaan padat (*solid*), sangat jarang yang mengamati karakteristik tumbukan droplet permukaan cair apalagi pada minyak goreng dengan temperatur tinggi.

Semua percobaan di atas dilakukan pada *pool* dengan temperatur ruangan, tetapi untuk eksperiment dalam tugas akhir dilakukan pada *pool* yang mendapat perlakuan panas dan jenisnya adalah minyak goreng. Pemanasan seperti ini penting dilakukan karena dalam penelitian ini berusaha untuk mengetahui fenomena dinamik dari droplet saat pemadaman dengan sistem kabut air yang mana api yang terjadi berada di atas permukaan minyak goreng.

### 1.12 Fenomena Cipratan Minyak Goreng Setelah Penetesan Droplet

Fenomena cipratan minyak goreng adalah fenomena penting pada intensifikasi kolam api dengan titik nyala yang tinggi. Pada percobaan *Worthington*[14] yang meneteskan droplet susu ke dalam air dan mengamati metode cipratan yang terjadi, menyimpulkan bahwa semakin tinggi ketinggian jatuh droplet akan menyebabkan semakin dalam lembah atau kawah yang terbentuk di air, hingga akhirnya juga mengakibatkan semakin tinggi kolom pantulan yang terjadi setelahnya. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi titik penetesannya maka momentum droplet akan semakin besar.

Sementara dalam percobaan yang dilakukan oleh *Monzello et al*[17] menemukan bahwa cipratan cairan dipengaruhi oleh angka *Webber* nya. Semakin rendah temperatur cairannya maka diperlukan angka *Webber* yang semakin tinggi agar terjadi cipratan. Untuk temperatur  $20^{\circ}\text{C}$ , nilai angka *Webber* kritisnya agar terjadi cipratan adalah 57, sementara untuk temperatur  $94^{\circ}\text{C}$  diperlukan angka *Webber* hanya 38. Selain itu dia juga menyatakan bahwa temperatur cairan atau minyak goreng juga mempengaruhi cipratan yang akan terjadi.



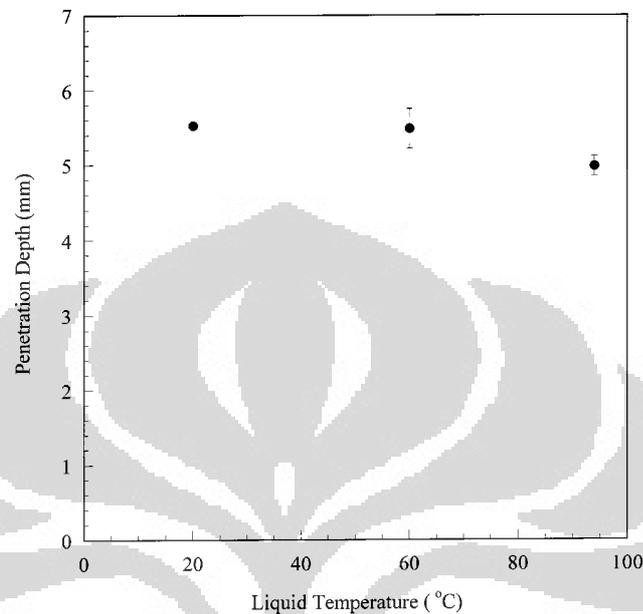
**Gambar 2.4** Angka *Webber* kritis agar terjadi cipratan pada cairan sebagai fungsi dari temperatur

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa nilai bilangan *Webber* kritis tidak turun secara signifikan hingga temperatur mencapai 60°C. Penurunan yang dramatis terjadi pada temperatur 94°C.

Untuk mencoba mengetahui mekanisme cipratan untuk bilangan *Webber* kritis yang berbeda, perlu diketahui dahulu mekanisme dari cipratan. Saat droplet menumbuk permukaan cairan, maka akan terbentuk lembah. Lembah ini akan mencapai kedalaman maksimum dan cairan akan mengalir ke dalam lembah tersebut, untuk mengisi ruang kosong pada lembah tersebut. Saat cairan mulai masuk ke dalam lembah ini, titik bawah lembah ini akan tetap. Setelah itu, cairan yang masuk itu akan bergerak ke atas karena adanya gaya dorong yang terbentuk pada dasar lembah itu. Dengan demikian akan ada sebagian massa dari cairan yang akan terciprat melalui permukaan cairan. Hal inilah yang disebut sebagai fenomena cipratan pada penetasan droplet.

Untuk mengetahui bahwa pengaruh temperatur cairan terhadap fenomena dinamik dari cipratan dan kedalaman kawah yang terjadi, maka dilakukan

percobaan dengan menetesakan droplet dengan nilai *Webber* yang tetap tetapi pada berbagai variasi temperatur cairan. Percobaan yang telah dilakukan oleh *Monzello* pada penetesan droplet pada permukaan cair dengan beberapa variasi temperatur dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut.



**Gambar 2.5** Kedalaman penetrasi sebagai fungsi dari temperatur pada nilai *Webber* yang tetap

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa kedalaman penetrasi atau kawah akan cenderung konstan hingga temperatur  $60^{\circ}\text{C}$ , tetapi pada temperatur  $94^{\circ}\text{C}$  terjadi penurunan kedalaman penetrasi yang signifikan seiring dengan naiknya temperatur. Dari kedua tabel di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada cairan perbedaan variasi yang besar terhadap fenomena cipratan dan penetrasi akan terjadi saat mulai temperatur  $94^{\circ}\text{C}$ .

Perbedaan kedalaman penetrasi ini diakibatkan oleh aliran konveksi di dalam *pool* atau cairan. Seperti diketahui bahwa jika suatu cairan dalam suatu wadah dipanaskan, maka akan terjadi peningkatan temperatur akibat dari perpindahan panas secara konveksi pada aliran itu. Dikatakan akan ada aliran konveksi dari dasar cairan itu yang bergerak ke atas. Cairan pada dasar gelas yang terlebih dahulu terpanaskan akan mengalami penurunan massa jenis sehingga

akan bergerak ke atas, sedangkan cairan di atas yang memiliki massa jenis yang lebih besar akan turun ke bawah. Kejadian ini berulang terus menerus sehingga temperatur pada cairan tersebut akan rata. *Rayleigh* berpendapat bahwa kondisi di atas dan di bawah permukaan adalah isothermal dan bebas. Berdasarkan analisisnya, dia menyimpulkan bahwa *fluida viskos* (cairan) akan stabil pada titik-titik tertentu. Daerah stabil dan labil digambarkan dengan bilangan non dimensional yang disebut sebagai bilangan *Rayleigh*, yang akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya.

Dalam percobaan *Monzello*, bahwa perpindahan panas konveksi telah terjadi pada cairan dengan temperatur 94<sup>0</sup>C. Sehingga dapat dispekulasikan bahwa perbedaan kedalaman penetrasi dan hubungan bilangan kritis *Webber* untuk cipratan terhadap temperatur, akan berhubungan dengan pergerakan di dalam fluida akibat perpindahan panas konveksi. Dengan adanya aliran konveksi, pencampuran cairan di dalam pool akan semakin besar. Dengan adanya pencampuran ini maka akan meningkatkan energi tumbukan dari droplet untuk dapat membentuk suatu kedalaman lembah. Hal inilah yang menyebabkan penurunan kedalaman penetrasi seiring dengan naiknya temperatur (dengan bilangan *Webber* yang sama).

*Engel*[18] menurunkan persamaan untuk kerja yang dibutuhkan untuk mengangkat cairan dalam lembah ke permukaan cairan. Persamaannya adalah sebagai berikut.

$$W = \pi \cdot g \cdot \rho \int_0^R (R^2 - r^2)r \cdot dr = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho \cdot R^4}{4} \quad (2.2)$$

dimana  $R$  adalah kedalaman maksimum kawah,  $r$  adalah posisi radial. Dalam analisis ini, lembah diasumsikan berbentuk *hemispherical*. Ada dugaan bahwa perbedaan cipratan yang terjadi juga berhubungan dengan kedalaman lembah yang terbentuk sebagai fungsi temperatur. Tumbukan droplet pada pool mengakibatkan *depresi* pada cairan atau pool, yang mana akan ada energi tumbukan yang digunakan dalam membentuk suatu lembah. Sehingga total energinya dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E_{total} = E_{crater} + E_{dissipated} \quad (2.3)$$

$E_{total}$  adalah energi total dari tumbukan droplet,  $E_{crater}$  adalah energi yang dibutuhkan untuk membentuk suatu lembah sedangkan  $E_{dissipated}$  adalah energi yang hilang selama impact. Jika energi totalnya tetap dan pada temperatur pool yang tinggi, maka akan lebih banyak energi total yang hilang saat tumbukan ( $E_{dissipated}$  semakin besar), sehingga akan mengurangi jumlah energi yang tersedia untuk membentuk lembah ( $E_{crater}$  semakin kecil) dengan demikian akan mengurangi kedalaman penetrasinya. Akibatnya, kerja yang diperlukan untuk mengangkat kawah ke permukaannya akan berkurang. Jadi dapat disimpulkan, pada temperatur pool yang tinggi, untuk energi impact yang tetap, diperlukan lebih sedikit tenaga untuk mengangkat ke permukaan dan untuk terciprat. Hal inilah yang menjadi penyebab bahwa semakin tinggi temperatur minyak goreng, maka nilai *Webber* kritis untuk terjadi cipratan akan semakin kecil (gambar 2.4).

Khusus dalam mempelajari fenomena cipratan pada minyak goreng, bahwa dari beberapa referensi diketahui jika titik nyala api untuk minyak goreng adalah sekitar 270<sup>0</sup>C, yang mana jauh lebih tinggi dari temperatur titik didih air yang 100<sup>0</sup>C. Perbedaan temperatur yang sangat tinggi ini akan semakin menyebabkan minyak goreng pada temperatur tersebut untuk terciprat bila ditetesi droplet air ataupun bila disemprot oleh kabut air. Kabut air yang mengenai permukaan minyak goreng panas ataupun api dari minyak goreng akan mengalami penguapan sehingga akan terjadi perpindahan panas dan nilainya pun akan semakin besar karena ukuran kabut air yang semakin kecil sehingga luas permukaannya semakin besar. Sedangkan droplet air yang memiliki diameter dan massa jenis yang lebih besar daripada kabut air akan memiliki nilai momentum yang lebih besar sehingga dia akan bisa menembus lapisan (*layer*) minyak goreng, sehingga akan mengalami penguapan yang sangat cepat di dalamnya, yang efeknya adalah ledakan dan cipratan dari minyak goreng itu. Sehingga dikatakan bahwa karena cipratan minyak goreng disebabkan oleh penguapan kabut air dan

momentumnya, maka semakin tinggi temperatur minyak goreng dan semakin tinggi angka *Webber* nya maka penguapan kabut air tersebut akan semakin besar.

Sehingga dari beberapa eksperiment yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa terjadinya cipratan pada penetes droplet ataupun penyemprotan kabut air disebabkan oleh : massa jenis air atau droplet, kapasitas panas oli, temperatur oli, angka *Webber* kabut air atau droplet.

### 1.13 Bilangan Tak Berdimensi Dalam Analisis Penetes Droplet

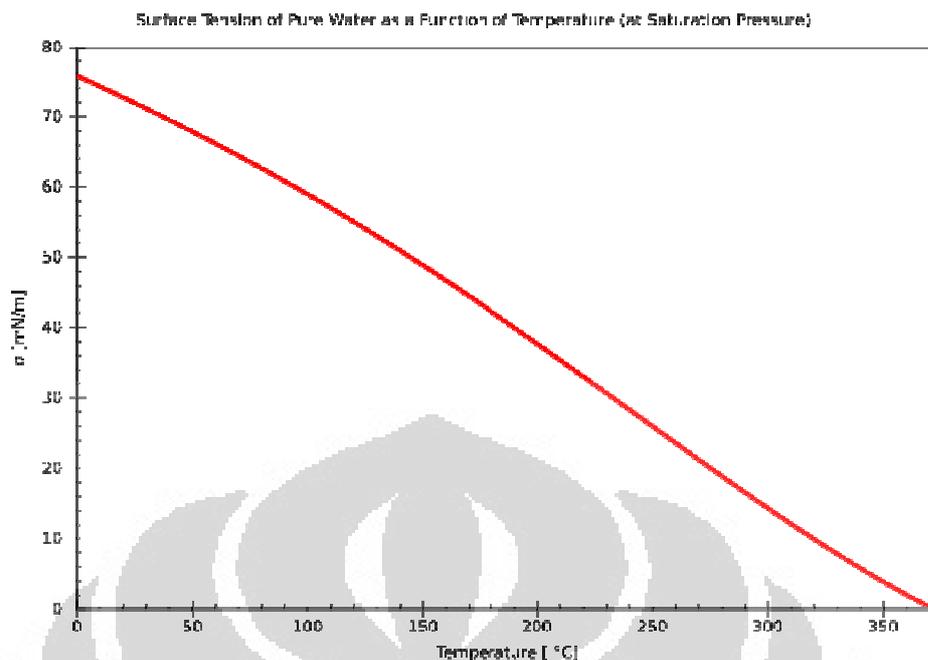
Ada beberapa bilangan tak berdimensi yang digunakan dalam analisis penetes droplet pada suatu media padat ataupun cair, namun satu yang paling utama adalah bilangan *Webber*. Bilangan *Webber* adalah bilangan tak berdimensi yang menggambarkan rasio atau perbandingan energi kinetik dengan energi permukaan atau tegangan permukaan dari droplet yang menimpa suatu permukaan (*free surface*). Bilangan *Webber* dirumuskan sebagai berikut[19] :

$$We = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \quad (2.4)$$

Dimana :

- $\rho$  = massa jenis air =  $1000 \text{ kg/m}^3$
- $v$  = kecepatan droplet saat impact dengan permukaan (m/s)
- $D$  = Diameter droplet (m)
- $\sigma$  = Tegangan permukaan air =  $72 \text{ dynes/cm} = 0,072 \text{ N/m}$  (pada temperatur  $25^{\circ}\text{C}$ )  
( $1 \text{ dyne} = 1 \text{ g}\cdot\text{cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2 = 10 \text{ }\mu\text{N}$ )

Untuk data tegangan permukaan air ( $\sigma$ ) pada beberapa temperatur dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut.



**Gambar 2.6** Tegangan permukaan air pada beberapa temperature

(Sumber : [http://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_tension](http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_tension))

Dalam percobaan yang dilakukan oleh *Monzello*[17], bahwa bilangan *Webber* dan temperatur dari minyak goreng akan mempengaruhi proses pemadaman api dari minyak goreng. Terutama dalam hal nilai adalah bilangan *Webber* dari kabut air atau droplet, akan mempengaruhi dalam hal kuantitas cipratan minyak goreng. Hubungannya adalah bahwa semakin tinggi bilangan *Webber* maka menyebabkan droplet tersebut akan mudah menembus lapisan minyak goreng karena tidak mengalami fase evaporasi di permukaan minyak goreng. Semakin tinggi bilangan *Webber* bisa berarti semakin besar diameter droplet air nya ataupun semakin tinggi kecepatan *impact* nya dengan permukaan *pool*. Akibatnya terjadi ledakan di dalam lapisan minyak goreng karena butiran droplet mengalami evaporasi di dalam lapisan minyak goreng yang dalam prosesnya disertai dengan munculnya ledakan. Ledakan-ledakan ini akan menimbulkan cipratan pada minyak goreng yang justru akan membuat intensitas api di permukaan minyak goreng semakin besar. Di lain hal, bahwa semakin tinggi bilangan *Webber* nya, akan menyebabkan cepatnya proses pendinginan di

permukaan minyak goreng dan juga akan meningkatkan proses pencampuran antara minyak panas dan dingin sehingga akan mendinginkan temperatur permukaan minyak goreng. Ukuran droplet berpengaruh besar terhadap besar kecilnya nilai bilangan Webber. Massa jenis air tidak berpengaruh besar, karena massa jenis air hampir sama nilainya disetiap temperatur air hingga 100°C.

Selain itu ada juga bilangan Froude (*Froude Number*) yang merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan gaya inersia dengan gaya gravitasi. Bilangan Froude biasanya digunakan untuk menghitung resistensi suatu objek yang bergerak di dalam air. Selain itu dikenal juga suatu bilangan yang disebut dengan bilangan Rayleigh (*Rayleigh Number*) yang merupakan bilangan tak berdimensi lainnya yang digunakan untuk menggambarkan daerah stabil dan daerah labil pada fluida. Dengan kata lain, bilangan ini terkait dengan aliran gerak gaya apung atau bouyancy nya atau yang biasa dikenal dengan konveksi bebas atau konveksi alami. Ketika bilangan Rayleigh di bawah nilai kritis untuk fluida tersebut, maka perpindahan panas akan terjadi secara konduksi, dan ketika melebihi nilai kritisnya maka perpindahan panasnya akan terjadi secara konveksi.

Bilangan Rayleigh adalah perkalian antara bilangan Grashof dengan bilangan Prandtl. Bilangan Grashof merupakan perbandingan antara gaya apung (buoyancy) dengan kekentalan (*viscosity*) dalam cairan, sedangkan bilangan Prandtl menggambarkan hubungan antara difusi momentum dan difusi thermal nya. Secara umum bilangan Rayleigh dapat dirumuskan sebagai [17] :

$$Ra_x = Gr_x \cdot Pr = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (\Delta T)x^3 \quad (2.5)$$

dimana :

- $Ra_x$  = Bilangan Rayleigh pada arah x
- $Gr_x$  = Bilangan Grashof pada arah x
- $Pr$  = Bilangan Prandtl
- $g$  = percepatan gravitasi
- $\beta$  = koefisien ekspansi thermal
- $\nu$  = viskositas kinematik

- $\alpha$  = difusi thermal cairan
- $\Delta T$  = perbedaan temperatur antara bagian bawah dan atas minyak
- $x$  = kedalaman pool

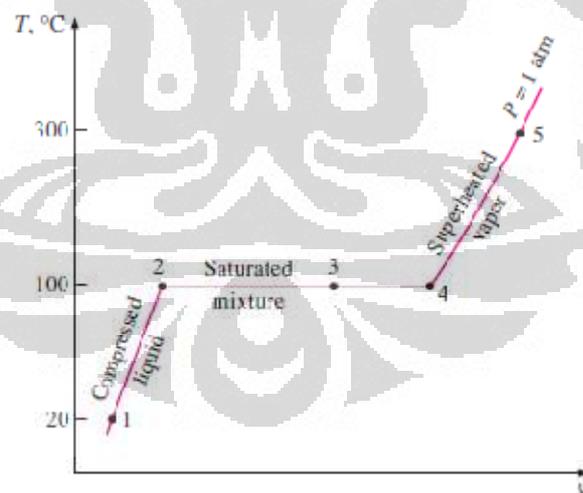
Bilangan Rayleigh kritis untuk permulaan konveksi pada permukaan horisontal dan bebas adalah 1100. Untuk temperatur yang lebih tinggi, nilai Rayleigh akan naik seiring dengan pergerakan konveksi di dalamnya.

### 1.14 Analisis Termodinamika Penetasan Droplet dan Kabut Air Pada Minyak Goreng

#### 2.8.1 Diagram Properties Untuk Proses Perubahan Fase

Variasi dari properties selama proses perubahan fase adalah cara terbaik untuk mempelajari analisis perubahannya. Selanjutnya akan dikenal dengan istilah diagram  $T$ - $v$ ,  $P$ - $v$  dan  $P$ - $T$  untuk substansi murni.

Perubahan air menjadi uap saat proses pemanasan air secara jelas dapat dilihat pada  $T$ - $v$  diagram yang terjadi pada tekanan konstan. Untuk tekanan 1 atm, grafik perubahannya dapat dilihat pada diagram berikut [20].

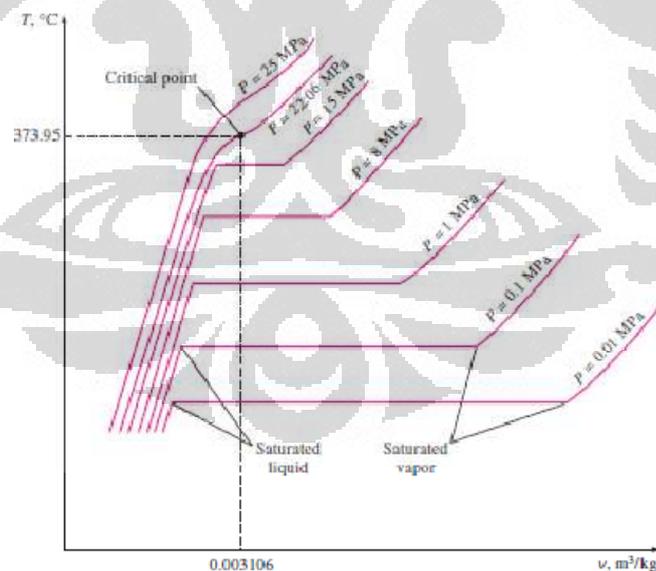


**Gambar 2.7**  $T$ - $v$  diagram untuk proses pemanasan air pada tekanan konstan (1 atm)

Jika tekanan dinaikkan hingga mencapai 1 Mpa (9,8 atm), maka air akan memiliki volume spesifik ( $v$ ) yang lebih kecil dibandingkan saat tekanan atmosfer (1 atm). Jika kita memberikan kalor (pemanasan) pada air pada tekanan yang lebih tinggi ini, maka akan mengalami perubahan dalam hal :

1. Air akan mulai mendidih pada temperatur yang lebih tinggi yaitu  $179,9^{\circ}\text{C}$ .
2. Volume spesifik *saturated liquid* nya akan bertambah besar, sedangkan volume spesifik *saturated vapor* nya akan bertambah kecil. Sehingga garis horisontal yang menghubungkan kondisi *saturated liquid* dan kondisi *saturated vapor* akan bertambah pendek.

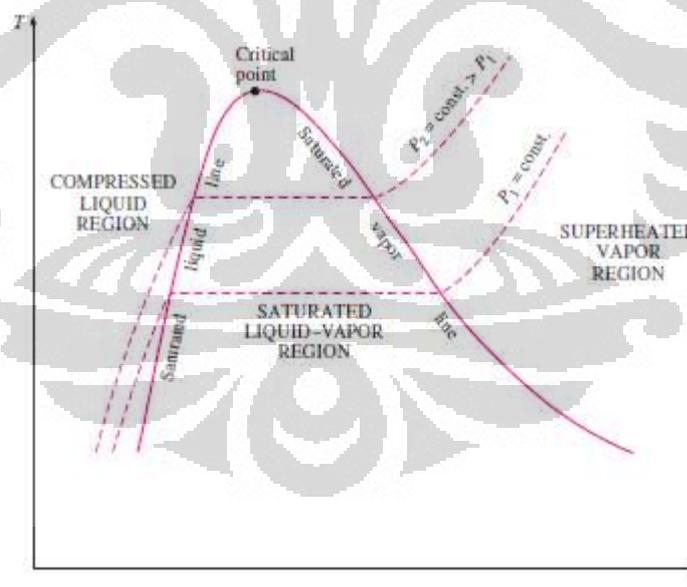
Jika tekanan ini dinaikkan terus menerus maka garis saturasi nya akan semakin pendek, dan ketika mencapai tekanan 22,09 Mpa (untuk air) maka tidak ada lagi garis saturasi atau dapat dikatakan mencapai titik kritis (*critical point*). Titik kritis disini adalah titik dimana kondisi *saturation liquid* dan *saturation vapor* nya dalam kondisi yang identik. Sehingga temperatur, tekanan dan volume spesifik pada titik kritis ini disebut dengan temperatur kritis ( $T_{cr}$ ), tekanan kritis ( $P_{cr}$ ) dan volume spesifik kritis ( $v_{cr}$ ). Untuk air nilainya masing-masing adalah :  $P_{cr} = 22,09$  Mpa,  $T_{cr} = 374,14^{\circ}\text{C}$  dan  $v_{cr} = 0,003155$   $\text{m}^3/\text{kg}$ [20].



**Gambar 2.8**  $T$ - $v$  diagram untuk air murni pada tekanan konstan pada beberapa variasi tekanan

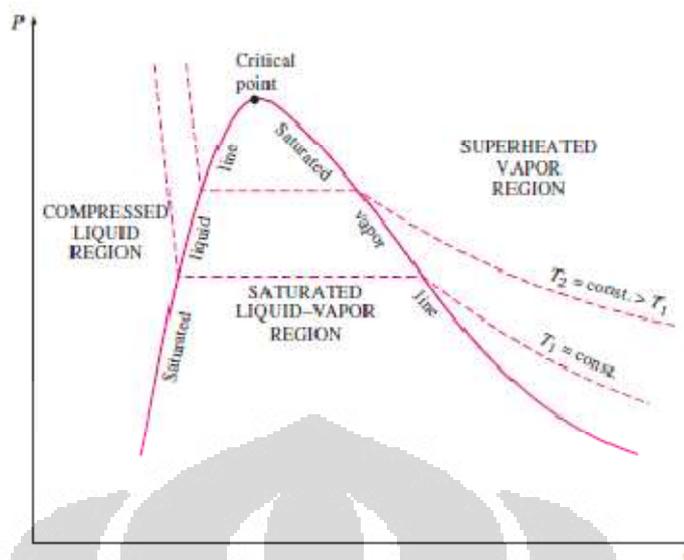
Di atas temperatur kritis tidak ada batas yang jelas pada proses perubahan fase nya. Sedangkan volume spesifik substansinya akan terus bertambah, pada tiap waktu hanya ada satu fase yang terjadi. Di atas kondisi kritis, tidak ada garis yang memisahkan antara daerah *compressed liquid* dengan daerah *superheated vapor*. Akan tetapi dalam analisisnya bisa dikatakan bahwa jika berada di atas temperatur kritis nya maka disebut substansi *superheated vapor* dan jika berada di bawah temperatur kritisnya maka disebut dengan substansi *compressed liquid*. Kondisi *saturated liquid* dapat dihubungkan dengan garis yang disebut dengan *saturated liquid line* dan pada kondisi *saturated vapor* dihubungkan dengan garis *saturated vapor line*. Daerah di tengah kubah disebut dengan daerah campuran cair-uap (*saturated liquid-vapor mixture region*). Daerah di sebelah kanan kubah uap disebut dengan daerah *superheated vapor*, dan daerah di sebelah kiri kubah uap disebut dengan daerah *compressed liquid*. Pada kedua daerah ini, substansi berada pada satu fase yaitu uap atau cair.

Untuk lebih detail tentang perbedaan masing-masing fase pada tiap daerah kurva dapat dilihat pada  $T$ - $v$  diagram berikut[20].



**Gambar 2.9**  $T$ - $v$  diagram dari zat murni

Untuk  $P$ - $v$  diagram secara garis besar mirip dengan  $T$ - $v$  diagram, hanya saja garis temperatur konstan pada diagram trend grafiknya adalah ke bawah[20].



**Gambar 2.10**  $P$ - $v$  diagram dari zat murni

### 2.8.2 Karakteristik Termodinamika Droplet Air dan Kabut Air Bila Ditetaskan di Permukaan Panas

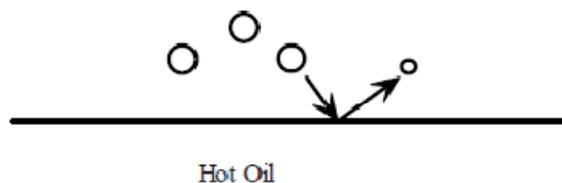
Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa pada penyemprotan kabut air atau droplet pada pemadaman kolam api minyak goreng akan mengakibatkan tercipratnya minyak goreng itu sendiri. Faktor-faktor yang mempengaruhi telah dijelaskan sebelumnya. Pada bab ini dijelaskan fenomena termodinamika saat terjadi interaksi antara droplet tersebut dengan minyak goreng. Saat terjadi interaksi antara droplet atau kabut air, disitulah terjadi fenomena perpindahan panas yang menyebabkan turunnya temperatur pada minyak goreng dan pada permukaan minyak goreng, sehingga dimungkinkan untuk memadamkan api yang ada. Secara teoritis, semakin tinggi nilai perpindahan panas yang terjadi maka akan semakin cepat proses pemadamannya.

Untuk itu dikenal suatu istilah efisiensi kabut air atau droplet pada pemadaman api minyak goreng. Faktor-faktor yang mempengaruhinya ada empat, yaitu [1] :

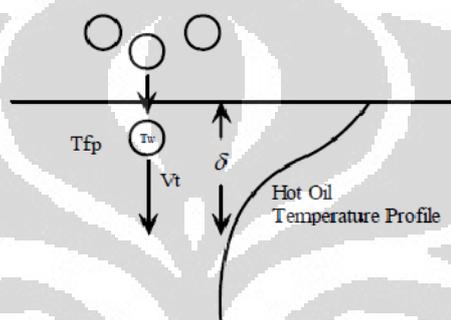
1. Proses pendinginan pada permukaan minyak goreng.
2. Proses pendinginan secara konveksi di dalam minyak goreng.

3. Percampuran antara minyak goreng dengan droplet
4. Cipratan minyak goreng yang terjadi

Proses yang terjadi saat terjadi interaksi antara kabut air atau droplet dengan permukaan minyak goreng dapat dilihat pada gambar berikut [1].



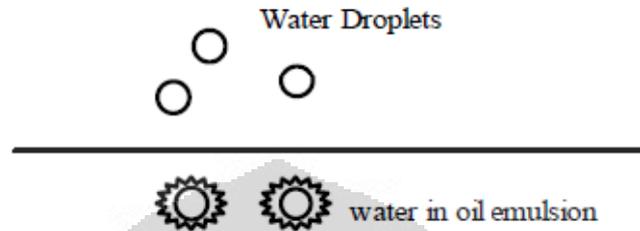
**Gambar 2.11** Kabut air saat menumbuk permukaan minyak goreng



**Gambar 2.12** Droplet air saat menumbuk permukaan minyak goreng

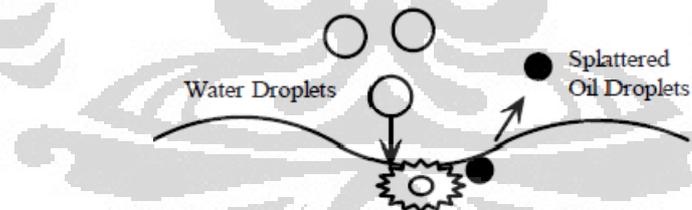
Pada gambar 2.11 dapat dilihat bahwa kabut air akan menyerap panas saat menumbuk permukaan minyak goreng dan terpental kembali ke lingkungan sekitar. Ukurannya pun akan semakin kecil karena dia mengalami proses evaporasi saat penyerapan panas itu. Peristiwa ini berlangsung sangat cepat, sehingga memungkinkan pengurangan temperatur di sekitar permukaan minyak goreng itu akibat proses perpindahan panas yang cepat akibat kecilnya ukuran kabut air itu. Apabila ukuran air lebih besar, seperti pada droplet air maka dia tidak sempat mengalami evaporasi, justru akan menembus ke dalam lapisan minyak goreng, dikarenakan memiliki massa jenis yang lebih besar dari minyak goreng, seperti terlihat pada gambar 2.12 di atas dan akan terjadi peristiwa pendinginan secara konveksi dalam lapisan minyak goreng tersebut. Dalam hal ini, penguapan droplet pada permukaan minyak goreng akan kecil, perpindahan panas secara konveksi yang lebih besar justru akan terjadi di dalam lapisan minyak goreng. Profil temperatur minyak goreng sedemikian rupa karena pemanasan

minyak goreng berasal dari atas akibat timbulnya api pada permukaan minyak goreng, sehingga semakin ke bawah temperturnya akan semakin dingin. Peristiwa selanjutnya adalah percampuran antara droplet air dengan minyak goreng di dalam lapisan minyak goreng, seperti terlihat pada gambar berikut [1].



**Gambar 2.13** Percampuran antara droplet dengan minyak goreng

Dapat dikatakan bahwa saat terjadi percampuran antara droplet air dengan minyak goreng adalah saat-saat dimana akan terjadi ledakan pada droplet akibat dinding droplet tidak mampu menahan tekanan yang sangat tinggi yang berasal dari dalam droplet akibat naiknya temperatur di dalam droplet yang merupakan efek perpindahan panas secara konveksi. Droplet air ini akan kelihatan sedikit mengembang atau membesar hingga akhirnya akan meledak dan mengakibatkan tercipratnya sebagian massa dari minyak goreng tersebut ke luar. Proses ini dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut [1].



**Gambar 2.14** Cipratan pada minyak goreng akibat dari ledakan pada droplet

Saat terjadi cipratan dari minyak goreng ini justru terjadi fenomena peningkatan intensitas api di permukaan minyak goreng, sehingga justru akan lebih berbahaya. Jadi dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem pemadam kabut air akan lebih aman bila dibandingkan sistem pemadam api biasa (*sprinkler*) yang mana ukuran droplet nya masih besar.

Dari keempat faktor di atas, hanya proses pendinginan pada permukaan minyak dan cipratan minyak goreng yang terjadi yang merupakan faktor paling penting dalam efektifitas pemadaman api. Efek proses pendinginan secara konveksi dan percampuran droplet dengan minyak goreng hanya sedikit memberikan nilai perpindahan panas, karena pada kenyataannya hanya akan sedikit droplet atau kabut air yang akan bisa menembus lapisan minyak goreng, karena sebagian besar droplet sudah mengalami fase evaporasi di permukaan droplet akibat temperatur yang sangat tinggi di permukaan minyak goreng.

### 1.15 Mode Pendidihan (*Boiling Mode*)

Ketika penguapan terjadi antara media pemisah padat dan cair, hal inilah yang disebut dengan pendidihan (*boiling*). Proses ini terjadi ketika temperatur permukaannya ( $T_s$ ) melebihi temperatur saturasi (didih) cairannya ( $T_{sat}$ ) pada tekanan standar 1 atm. Perpindahan panas ini terjadi dari permukaan padat ke cair yang sesuai dengan hukum *Newton* tentang pendinginan yaitu [25] :

$$q_s'' = h(T_s - T_{sat}) = h \cdot \Delta T_e \quad (2.6)$$

dimana  $\Delta T_e$  adalah temperatur eksese (berlebih). Proses ini ditandai dengan terbentuknya gelembung-gelembung uap (udara) yang muncul dan sesudah itu memisahkan diri dari permukaan padat. Formasi dinamik dari gelembung uap ini akan berpengaruh pada pergerakan fluida di dekat permukaan, oleh karena itu akan berpengaruh kuat pada koefisien perpindahan panas ( $h$ ).

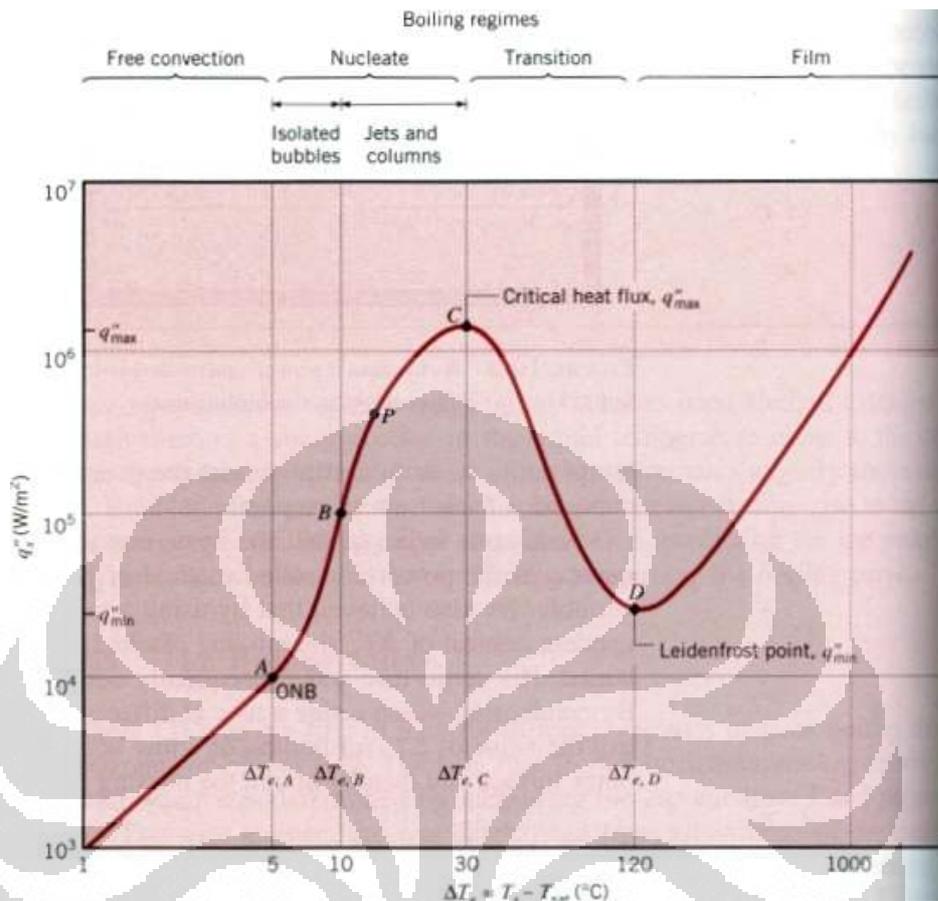
Pendidihan dapat terjadi dalam berbagai kondisi, seperti pada pendidihan *pool* (*pool boiling*), cairan akan cenderung diam dan pergerakannya di dekat permukaan adalah disebabkan oleh konveksi bebas serta menyebabkan pertumbuhan gelembung dan pemisahannya. Hal sebaliknya terjadi pada pendidihan dengan konveksi paksa, pergerakan fluida dipengaruhi oleh faktor dari luar, sama seperti pada konveksi bebas.

Pendidihan juga dapat diklasifikasikan menjadi apakah itu *subcooled* atau *saturated*. Pada pendidihan *subcooled*, temperatur dari cairan berada di bawah

temperatur saturasi nya dan gelembung-gelembung dari cairan dibawah temperatur saturasinya dan gelembung yang terbentuk pada permukaan dapat terkondensasi di cairan. Hal ini bertolak belakang pada kondisi *saturated boiling*, dimana temperatur cairan sedikit melebihi temperatur saturasinya. Gelembung udara terbentuk pada cairan, kemudian terdorong melalui cairan tersebut akibat gaya bouyancy sehingga akhirnya terlepas dari permukaan wadahnya itu.

### 2.9.1 Pendidihan Pool (*Pool Boiling*)

Mekanisme pada pendidihan *pool* yang bisa dilihat dalam kurva pendidihan air pada tekanan 1 atm (gambar 2.15) dimana terdapat beberapa daerah (regime) pendidihan yang tergantung dari selisih temperatur permukaan ( $T_s$ ) dengan temperatur saturasi cairan tersebut ( $T_{sat}$ ) atau disebut dengan temperatur ekses ( $\Delta T_e$ ) [25]. Model kurva ini juga memiliki karakteristik atau trend yang hampir sama pada jenis cairan lainnya. Pada dasarnya *heat flux surface* ( $q_s''$ ) dipengaruhi oleh koefisien konveksi ( $h$ ) dan temperatur ekses ( $\Delta T_e$ ).



**Gambar 2.15** Grafik pendidihan air pada tekanan 1 atm [25]

Adapun metode pada kurva pendidihan air di atas adalah :

1. *Free Convection Boiling* (Pendidihan Konveksi Bebas)

Pendidihan konveksi bebas terjadi jika  $\Delta T_e \approx 5^\circ\text{C}$ . Pada daerah ini tidak cukup uap yang bersinggungan dengan cairan yang menyebabkan pendidihan pada temperatur saturasinya. Saat temperatur eksenya meningkat, gelembung akan sering muncul tetapi hanya sampai di bawah titik A atau sampai  $\Delta T_e \approx 5^\circ\text{C}$ , yang mana pergerakan fluida secara prinsip dipengaruhi oleh konveksi bebas.

2. *Nucleate Boiling* (Pendidihan Nucleate)

Pendidihan *nucleate* terjadi jika  $\Delta T_e \approx 30^\circ\text{C}$ . Pada kisaran ini, terjadi dua daerah aliran yang berbeda. Pada kisaran temperatur A-B, terbentuk

*isolated bubbles* pada daerah *nucleation* dan tersebar jauh dari permukaan. Penyebaran gelembung ini menyebabkan pencampuran cairan di sekitar permukaan dan jumlahnya akan meningkat seiring dengan naiknya  $h$  dan  $q_s''$ . Pada regime ini, perpindahan panas sebagian besar terjadi melalui perpindahan langsung dari permukaan ke dalam cairan melalui pergerakan pada permukaan tersebut, dan tidak melalui gelembung-gelembung uap yang timbul dari permukaan tersebut. Saat  $\Delta T_e$  kembali meningkat, maka akan lebih banyak daerah *nucleation* yang aktif dan mengakibatkan meningkatnya formasi uap yang menyebabkan interferensi gelembung dan *coalescence*. Pada daerah B-C, uap dilepaskan sebagai *jet* atau *columns*, yang mana secara bertahap bergabung menjadi *slugs* dan uap. Pada titik C disebut dengan titik kritis *flux* kalor (*critical heat flux*) dan pada tekanan 1 atm jumlahnya lebih dari  $1 \text{ MW/m}^2$ . Karena jumlah rata-rata perpindahan panas dan koefisien konveksi dihubungkan dengan jumlah temperatur eksese yang kecil, maka disarankan untuk mengoperasikan berbagai alat atau mesin pada daerah pendidihan *nucleate*.

### 3. *Transition Boiling* (Pendidihan Transisi)

Jika nilai  $\Delta T_e \approx 120^\circ\text{C}$  maka disebut dengan daerah pendidihan transisi atau pendidihan film yang tidak stabil (*unstable film boiling*) atau pendidihan film sebagian (*partial film boiling*). Formasi gelembung sangat cepat terbentuk daripada lapisan uapnya. Di setiap titik pada permukaan, kondisinya dapat berupa pendidihan *film* atau pendidihan *nucleate*, tetapi total permukaannya diselubungi oleh suatu lapisan (*film*) yang akan meningkat seiring meningkatnya  $\Delta T_e$ . Karena konduktifitas *thermal* dari uap lebih kecil daripada konduktifitas *thermal* air maka nilai  $h$  dan  $q_s''$  akan menurun seiring dengan meningkatnya  $\Delta T_e$ .

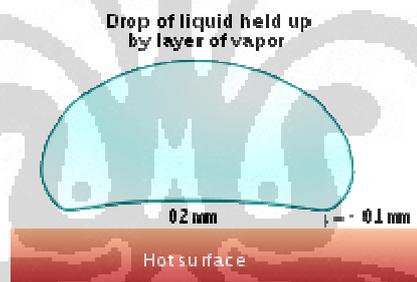
### 4. *Film Boiling* (Pendidihan Film)

Terjadi jika  $\Delta T_e \geq 120^\circ\text{C}$ . Pada titik D pada kurve pendidihan disebut dengan titik *Leidenfrost*, yang mana nilai  $q_s''$  mencapai nilai yang paling kecil dan permukaan tertutup dengan uap seluruhnya. Dengan demikian,

perpindahan panas dari permukaan ke cairan akan berlangsung secara konduksi melalui lapisan uap ini. Fenomena ini pertama kali diamati oleh *Leidenfrost* pada tahun 1756 yang mana dia menemukan bahwa droplet atau butir air yang diselimuti oleh lapisan uap akan mengalami pendidihan yang lebih lambat. Saat temperatur kembali ditingkatkan, radiasi melalui lapisan uap ini akan menjadi signifikan sehingga *heat flux* akan meningkat seiring dengan meningkatnya  $\Delta T_e$ .

### 2.9.2 Efek *Leidenfrost*

Efek *Leidenfrost* adalah fenomena ketika suatu cairan atau droplet yang ditempatkan pada suatu massa yang memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi daripada titik didih cairan ( $T_{sat}$ ) tersebut. Akibatnya akan terbentuk suatu lapisan pelindung uap (*insulating vapor layer*) yang menahan cairan untuk mendidih secara cepat (*rapidly*).



**Gambar 2.16** Droplet air yang diselimuti oleh lapisan uap (*layer of vapor*)

Jika melihat pada kurva pendidihan air maka efek *Leidenfrost* mulai terjadi saat  $T_s - T_{sat} \geq 120^{\circ}\text{C}$  dan termasuk dalam fase *film boiling* (gambar 2.15).

Karena droplet diselimuti oleh selimut uap (*vapor blanket*), maka perpindahan panas dari permukaan ke dalam cairan akan menjadi perpindahan panas secara konduksi melalui selimut uap ini. Akibatnya droplet air yang diselimuti oleh selimut uap ini akan lebih lambat mendidihnya. Hal ini bila dibandingkan dengan droplet yang ditetaskan pada permukaan yang memiliki temperatur  $100^{\circ}\text{C}$ , maka droplet tersebut akan langsung berubah fase menjadi uap

seluruhnya. Seiring dengan meningkatnya temperatur permukaan, maka radiasi melalui lapisan uap ini akan meningkat signifikan atau dapat dikatakan *heat flux* akan meningkat dengan meningkatnya  $\Delta T_e$ .

Sebagai perbandingan, jika droplet ditetaskan pada permukaan (cairan) yang temperaturnya di bawah  $100^{\circ}\text{C}$  maka akan mengalami evaporasi yang lambat. Dan apabila ditetaskan pada temperatur di atas  $100^{\circ}\text{C}$  maka akan terjadi evaporasi yang sangat cepat. Dan apabila temperaturnya mencapai titik *Leindenfrost*, maka droplet tidak akan lagi mengalami evaporasi yang sangat cepat, akan tetapi droplet ini akan terpecah-pecah menjadi ukuran yang lebih kecil dan bergerak dengan cepat disekitarnya.



## **BAB III**

### **PERENCANAAN PENGUJIAN**

Tujuan percobaan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui interaksi antara droplet atau kabut air dengan minyak goreng serta fenomena cipratan dan letupan yang terjadi setelah penetasan droplet atau penyemprotan kabut air pada minyak goreng pada temperatur tertentu. Selain itu penelitian juga untuk mencari temperatur kritis dari minyak goreng untuk terjadi letupan. Penelitian selanjutnya juga akan mengamati pengaruh letupan dalam minyak goreng terhadap karakteristik perubahan temperatur minyak goreng per satuan waktu.

Pengujian yang disebutkan di atas merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya yang mengamati efektifitas pemadaman kolam api dengan sistem pemadam kabut air, dimana pada penelitian kali ini lebih menekankan kepada pemahaman interaksi dari droplet atau kabut air dengan minyak goreng yang merupakan sumber nyala api tersebut. Sehingga penelitian cukup dilakukan di bawah temperatur nyalanya (*flash point*) dari minyak goreng tersebut, yang mana hanya dilakukan pada temperatur maksimal 220<sup>0</sup>C.

#### **3.1 Konsep Perencanaan Pengujian Penetasan Droplet dan Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng**

Pada percobaan yang pertama, pengujian dilakukan dengan cara meneteskan satu droplet atau kabut air ke dalam minyak goreng dengan volume 30 mL yang diletakkan dalam suatu gelas *pyrex* ukuran 50 mL. Minyak goreng tersebut sebelumnya telah dipanaskan hingga temperatur 220<sup>0</sup>C. Setelah itu reaksi yang terjadi setelahnya diamati dengan menggunakan *High Speed Video Camera* dengan pengaturan jarak perekaman dan pengaturan pencahayaan, sehingga akan didapatkan data berupa video dan gambar *sequence* saat terjadi interaksi antara

keduanya. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk merekam berbagai fenomena yang terjadi sesaat setelah droplet atau kabut air tersebut berinteraksi dengan minyak goreng setelah dijatuhkan dari beberapa variasi ketinggian.

Dengan melihat berbagai parameter yang diinginkan di atas maka perancangan pengujian dan batasan pengujian dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Untuk pemanasan minyak goreng digunakan pemanas elektrik yang dihubungkan ke *temperature controller* dengan maksud untuk mengatur dan mengontrol temperatur minyak goreng pada temperatur ujinya, yaitu 220°C.



**Gambar 3.1** Pemanas elektrik yang dikontrol oleh *temperature controller*

- Untuk memvariasikan ketinggian penetasan droplet maka jarum suntik sebagai alat untuk menghasilkan droplet diikat pada suatu pipa yang mana pipa tersebut dapat diatur ketinggiannya sesuai dengan yang diinginkan.

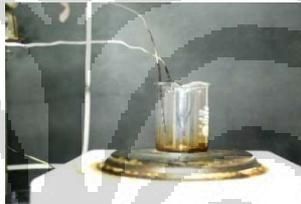


**Gambar 3.2** Jarum suntik yang diikat pada pipa yang dapat di atur ketinggiannya



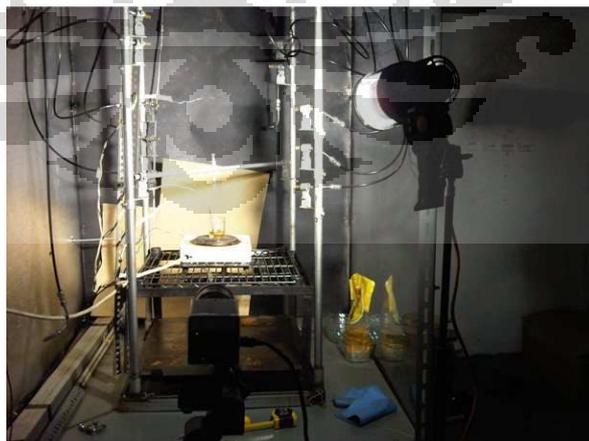
**Gambar 3.3** Nozel kabut air yang diikatkan pada pipa yang dapat di atur ketinggianya

- Diperlukan setidaknya dua termokopel untuk mengukur temperatur di dalam minyak goreng, yang mana satu termokopel dihubungkan ke *temperature controller* dan satu termokopel lagi dihubungkan ke suatu alat data akuisisi atau data *logger* untuk merekam perubahan temperaturnya.



**Gambar 3.4** Dua buah termokopel yang dihubungkan ke *temperature controller* dan data akuisisi

- Untuk keselamatan, semua pengujian dilakukan di suatu ruangan atau tempat yang ditutupi oleh kabinet transparan yang menggunakan *acrylic*.



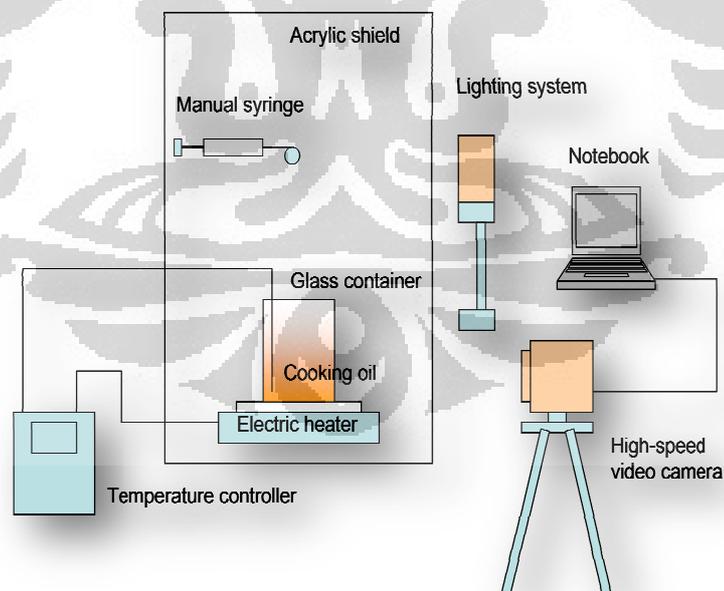
**Gambar 3.5** Penempatan alat pengujian dalam kabinet yang dibatasi *acrylic*

- Semua pengujian direkam dengan menggunakan *High Speed Video Camera* yang dibantu dengan sistem pencahayaan untuk mendapatkan video dan gambar rekaman yang terang.

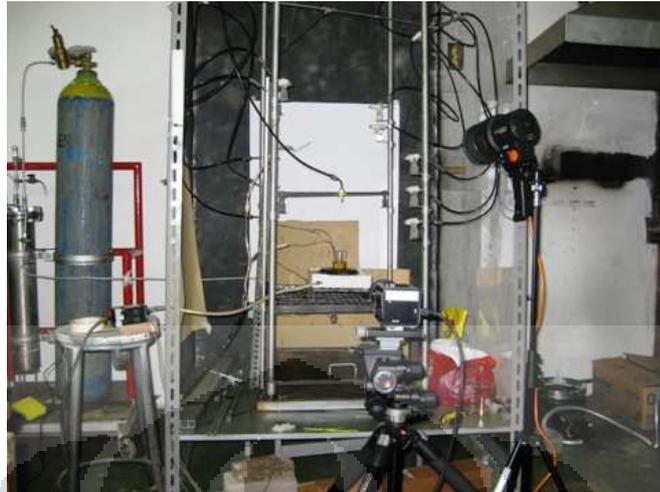


**Gambar 3.6** Penempatan *High Speed Video Camera* dan sistem pencahayaan

Secara keseluruhan, skema dan rancangan percobaan dalam pengujian yang pertama ini dapat dilihat pada gambar 3.7 dan gambar 3.8 berikut.



**Gambar 3.7** Skema pengujian penetasan droplet dan kabut air pada minyak goreng



**Gambar 3.8** Perencanaan pengujian penetes droplet dan kabut air pada permukaan minyak goreng

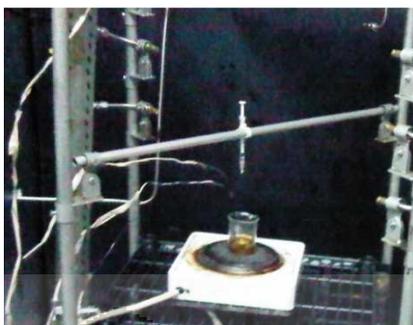
### 3.2 Konsep Perencanaan Pengujian Penetes Droplet Guna Mencari Temperatur Kritis Minyak Goreng Untuk Terjadi Letupan

Pada percobaan yang kedua ini, pengujian dilakukan untuk menentukan temperatur kritis dari minyak goreng untuk terjadi letupan. Perancangan alat pengujian hampir sama dengan percobaan pertama, hanya pada percobaan kali ini tidak menggunakan *High Speed Video Camera*, dan hasil pengujian didasarkan pada pengamatan langsung kepada minyak goreng. Tujuan dari percobaan kali ini adalah untuk mengetahui sampai temperatur berapakah minyak goreng tidak meledak bila ditetaskan droplet. Pada percobaan kali ini, ketinggian penetes droplet di tetapkan hanya pada jarak 20 cm dari permukaan minyak goreng.

Dengan melihat berbagai parameter yang diinginkan di atas maka perancangan pengujian dan batasan pengujian dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Untuk pemanasan minyak goreng digunakan pemanas elektrik yang dihubungkan ke *temperature controller* dengan maksud untuk mengatur dan mengontrol temperatur minyak goreng pada tiap angka yang diinginkan.

- Jarum suntik sebagai alat untuk menghasilkan droplet diikat pada suatu pipa dengan ketinggian 20 cm dari permukaan minyak goreng.



**Gambar 3.9** Jarum suntik yang diikatkan pada pipa dengan ketinggian 20 cm dari permukaan minyak goreng

- Diperlukan setidaknya dua termokopel untuk mengukur temperatur di dalam minyak goreng, yang mana satu termokopel dihubungkan ke *temperature controller* dan satu termokopel lagi dihubungkan ke suatu alat data akuisisi atau data *logger* untuk mengukur temperaturnya.
- Untuk keselamatan, semua pengujian dilakukan di suatu ruangan atau tempat yang ditutupi oleh kabinet transparan yang menggunakan *acrylic*.

### 3.3 Konsep Perencanaan Pengujian Pengaruh Letupan Pada Minyak Goreng Terhadap Karakteristik Perubahan Temperatur Minyak Goreng

Untuk melakukan pengujian pengaruh penetesan droplet air terhadap karakteristik perubahan temperatur minyak goreng maka dilakukan percobaan dengan prosedur yang hampir sama dengan percobaan kedua, dimana perubahan temperatur direkam dengan menggunakan data akuisisi dan tanpa menggunakan *High Speed Video Camera*. Yang membedakannya adalah pada data yang diperoleh dimana pada percobaan kali ini, data yang direkam pada data akuisisi akan di plot ke dalam grafik pada masing-masing temperatur yang diuji. Karakteristik grafik yang dihasilkan kemudian akan dianalisa berdasarkan pendekatan termodinamika. Jadi, tujuan pengujian ini adalah untuk melihat

apakah letupan yang terjadi pada minyak goreng mempengaruhi karakteristik perubahan temperatur pada minyak goreng.

Dengan melihat berbagai parameter yang diinginkan di atas maka perancangan pengujian dan batasan pengujian dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Untuk pemanasan minyak goreng digunakan pemanas elektrik yang dihubungkan ke *temperature controller* dengan maksud untuk mengatur dan mengontrol temperatur minyak goreng pada tiap temperatur yang diinginkan.
- Jarum suntik sebagai alat untuk menghasilkan droplet diikat pada suatu pipa dengan ketinggian 20 cm dari permukaan minyak goreng.
- Diperlukan setidaknya dua termokopel untuk mengukur temperatur di dalam minyak goreng, yang mana satu termokopel dihubungkan ke *temperature controller* dan satu termokopel lagi dihubungkan ke suatu alat data akuisisi atau data *logger* untuk mengukur temperaturnya.
- Untuk keselamatan, semua pengujian dilakukan di suatu ruangan atau tempat yang ditutupi oleh kabinet transparan yang menggunakan *acrylic*.

## **BAB IV**

### **METODOLOGI PENGUJIAN**

#### **5.1 Tujuan Pengujian**

Tujuan dari pengujian yang dilakukan adalah untuk mengetahui fenomena dan interaksi yang terjadi antara droplet dan kabut air yang di tumbukkan pada minyak goreng dibawah temperatur nyalanya (*flash point*). Fenomena yang terjadi bisa berupa bentukan kawah (*crater*), cipratan (*splashing*), ledakan atau letupan (*explosion*) dan timbulnya gelembung udara (*bubble*). Pengujian dikonsentrasikan pada pengamatan kedalaman kawah, intensitas letupan yang terjadi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Selain itu juga diamati metode letupan yang terjadi dan efek yang ditimbulkannya. Dengan mengetahui fenomena yang terjadi, maka pada akhirnya didapatkan suatu karakteristik letupan dan pengaruhnya terhadap perubahan temperatur pada tiap interaksi antara droplet dan kabut air pada berbagai macam jenis minyak dengan berbagai variasi temperatur.

#### **5.2 Komponen Pengujian**

Beberapa alat pengujian yang digunakan dalam percobaan ini meliputi :

1. Minyak goreng

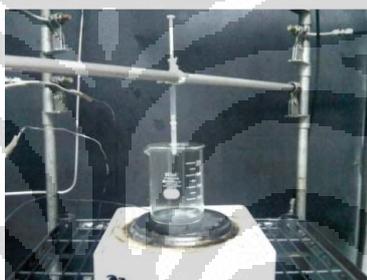
Digunakan *sample* tiga jenis minyak goreng yang ada di pasaran dan sudah melalui proses penyaringan dari pabriknya, yaitu : minyak sawit, minyak jagung dan minyak kelapa.



**Gambar 4.1** Jenis minyak goreng yang digunakan dalam pengujian

2. Gelas *pyrex*

Gelas *pyrex* adalah gelas yang tahan terhadap temperatur tinggi ( $\pm 300^{\circ}\text{C}$ ). Gelas *pyrex* digunakan sebagai wadah minyak goreng yang nantinya akan dipanaskan dengan pemanas elektrik hingga temperatur  $220^{\circ}\text{C}$ . Gelas *pyrex* yang digunakan adalah yang mempunyai diameter 45 mm.



**Gambar 4.2** Gelas *Pyrex* yang diletakkan di atas pemanas elektrik

3. Pemanas Elektrik

Digunakan untuk memanaskan minyak goreng di dalam gelas *pyrex* hingga temperatur  $220^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4.3** Pemanas elektrik (*heater*) untuk memanaskan minyak goreng

#### 4. *Temperature Controller*

Alat ini dihubungkan ke pemanas elektrik, dan berfungsi untuk mengontrol temperatur pada minyak goreng sesuai dengan nilai yang kita inginkan. Prinsip kerja alat ini adalah dengan memutuskan dan menyambung arus listrik secara otomatis, sesuai dengan inputan (*settingan*) temperatur yang telah di atur sebelumnya.



**Gambar 4.4** *Temperature controller*

#### 5. Termokopel

Termokopel digunakan untuk mengukur temperatur minyak goreng di dalam gelas *pyrex*. Jenis yang digunakan adalah termokopel tipe K. Ujung sensor termokopel diletakkan di tengah ketinggian minyak dan jangan sampai menempel di dasar gelas untuk menjamin keakuratan data yang dihasilkan. Ada dua buah termokopel yang digunakan, yang pertama hasil pengukurannya dibaca dengan *temperature controller* dan yang kedua dibaca dengan suatu alat data akuisisi dan hasil rekaman temperatur disimpan ke dalam laptop.



**Gambar 4.5** Termokopel

#### 6. Data Akuisisi

Data akuisisi yang digunakan adalah *Advantech Portable Data Acquisition Module* type USB-4718. Data akuisisi ini digunakan untuk membaca hasil pengukuran temperatur termokopel tipe K yang ujungnya diletakkan di dalam minyak goreng.



**Gambar 4.6** Data Akuisisi (Data Logger)

Data akuisisi ini menggunakan software *Adam view* sebagai *interface* yang dioperasikan dengan menggunakan sistem operasi *Windows XP*. Data keluaran *Adamview* adalah berupa file *notepad* yang bisa langsung terbaca berdasarkan *channel* yang digunakan.

#### 7. *High Speed Video Camera*

Adalah suatu kamera perekam dengan kecepatan tinggi yang digunakan untuk merekam semua fenomena dan kejadian yang terjadi setelah droplet atau kabut air menimpa permukaan minyak goreng. Jenis yang digunakan adalah *Redlake Motion Xtra HG-SE Digital High-Speed Camera* dengan 1000 *frame per second* dan *shutter speed* nya 1000  $\mu$ s. Sedangkan lensa yang digunakan adalah *Nikon Micro Lens 60 mm*. Untuk membantu penerangan maka digunakan sistem pencahayaan terpisah dengan lampu sorot *halogen 1000 Watt*.



**Gambar 4.7** *High Speed Video Camera*

8. Jarum suntik

Jarum suntik yang digunakan adalah jarum suntik manual yang bisa menghasilkan droplet dengan ukuran  $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ .



**Gambar 4.8** Jarum suntik

9. Tabung Nitrogen dan *Regulator*

Untuk menghasilkan air yang bertekanan digunakan nitrogen bertekanan sebagai tenaga pendorong.



**Gambar 4.9** Tabung Nitrogen dan *Pressure Regulator*

#### 10. *Pressure Vessel*

Hal yang perlu diperhatikan adalah air yang dimasukkan ke dalam *pressure vessel* tidak boleh terdapat kotoran yang dapat menyebabkan tersumbatnya nosel.



**Gambar 4.10** *Pressure Vessel*

#### 11. Nosel

Agar dapat menghasilkan droplet air dengan ukuran yang memenuhi syarat kabut air, maka harus digunakan nosel yang sesuai dengan kebutuhan. Nosel yang akan dipakai dalam pengujian ini adalah nosel yang biasa dipakai di dalam rumah kaca untuk melembabkan dan menjaga temperatur tanaman. Nosel ini dipilih terutama karena alasan yang praktis, yaitu kemudahan untuk mendapatkannya di pasaran, dimana nosel khusus yang digunakan untuk pemadam kebakaran yang sesuai standar tidak terdapat di pasaran Indonesia, dan harganya yang relatif sangat mahal.



**Gambar 4.11** *Nosel Greenhouse*

#### 12. Pipa saluran air

Sistem kabut air ini menggunakan pipa yang terbuat dari bahan *stainless steel*. Memiliki ukuran  $\frac{1}{4}$  inchi. Pipa ini cukup baik untuk menahan tekanan tinggi, dimana setiap sambungan menggunakan *ferrul* agar sambungan kuat dan tidak bocor. Untuk bagian pipa yang fleksibel maka

digunakan *plastic tube* ukuran  $\frac{1}{4}$  inchi agar memudahkan dalam mengatur ketinggian dari nosel.

### 13. *Pressure Gauge*

Alat ini untuk mengetahui tekanan air yang mengalir menuju nosel.



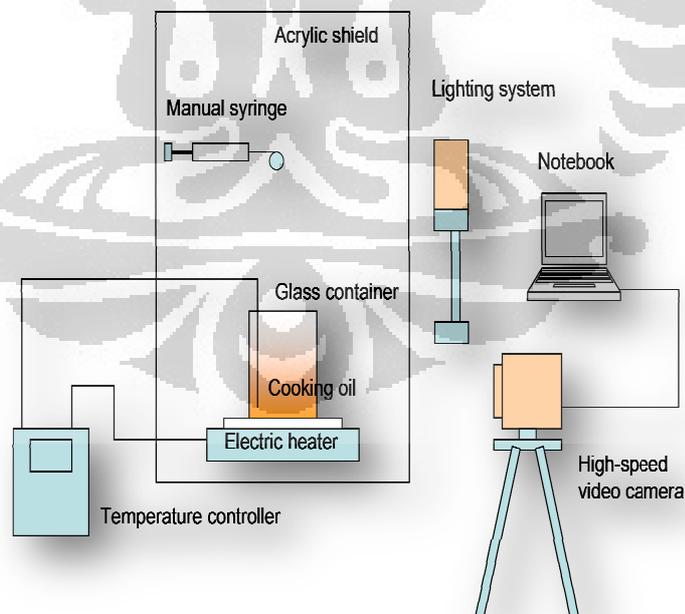
**Gambar 4.12** Pipa dan *Pressure Gauge* yang digunakan

### 14. *Stopwatch*

Untuk menghitung lama penyemprotan kabut air ke dalam minyak goreng diukur dengan menggunakan *stopwatch*.

## 5.3 Instalasi Pengujian

Skema pengambilan data pengujian dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.13** Skema pengambilan data pengujian

Minyak goreng dengan volume 30 mL ditempatkan di dalam gelas *pyrex*, lalu dipanaskan di atas pemanas elektrik. Temperatur minyak goreng diukur dengan menggunakan termokopel yang dihubungkan ke *temperature controller* dan data akuisisi. *High Speed Video Camera* ditempatkan pada jarak sedemikian hingga dari gelas sehingga didapatkan gambar yang pas dan bisa mewakili fenomena di dalam gelas saat penetasan droplet. Sistem pencahayaan tambahan di tempatkan di sekeliling gelas untuk menambah kualitas dan ketajaman gambar atau video yang didapatkan. Pelindung *acrylic* ditempatkan di sekeliling gelas untuk melindungi penguji dari letupan atau cipratan minyak goreng. Saat pengujian dengan kabut air, jarum suntik dilepas dan digantikan dengan nosel kabut air dan disemprotkan dengan jarak 20 cm di atas permukaan minyak goreng selama 1 detik. Tekanan pada sistem kabut air ini adalah 400 psi.

#### 5.4 Variasi Pengambilan Data

Pengujian dan pengambilan data dilakukan di laboratorium Termodinamika Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pengambilan data tersebut meliputi :

1. Pengambilan data berupa video rekaman interaksi antara satu tetes butir air (droplet) dengan tiga jenis minyak goreng yaitu : minyak sawit, minyak jagung dan minyak kelapa dengan volume 30 mL dan temperatur 220<sup>0</sup>C yang ditempatkan pada gelas *pyrex* diameter 45 mm, dengan memvariasikan ketinggian jatuh droplet pada ketinggian 10 cm, 20 cm dan 30 cm dari permukaan minyak goreng dan dengan diameter droplet 2 mm ± 0,1 mm.
2. Pengambilan data berupa video rekaman interaksi kabut air yang disemprotkan dari satu buah nosel 0,3 mm dengan tekanan pada sistem pemadam kabut air sebesar 400 *psi* pada ketiga jenis minyak goreng yaitu : minyak sawit, minyak jagung dan minyak kelapa dengan volume 30 mL dan temperatur 220<sup>0</sup>C yang ditempatkan pada gelas *pyrex* diameter 45 mm, pada ketinggian penyemprotan 20 cm dari permukaan minyak goreng dengan lama penyemprotan kabut air selama 1 detik tiap penyemprotan.

3. Pengambilan data kualitatif berupa ada tidaknya cipratan dan letupan jika satu tetes air (droplet) di teteskan pada ketiga jenis minyak goreng yaitu minyak sawit, minyak jagung dan minyak kelapa pada berbagai variasi temperatur minyak goreng. Percobaan ini untuk mengetahui temperatur kritis minyak goreng untuk meledak jika ditetesi air.
4. Pengambilan data untuk menganalisa pengaruh letupan dalam minyak goreng setelah penetesannya satu droplet air terhadap karakteristik perubahan temperatur minyak goreng per satuan waktu. Data diambil pada beberapa variasi temperatur hingga temperatur kritisnya untuk terjadi letupan. Pada akhirnya, data dari percobaan ini akan berupa grafik perubahan temperatur terhadap waktu pada beberapa variasi temperatur. Analisa dilakukan atas dasar karakteristik dari grafik yang dihasilkan.

## **5.5 Prosedur Pengambilan Data**

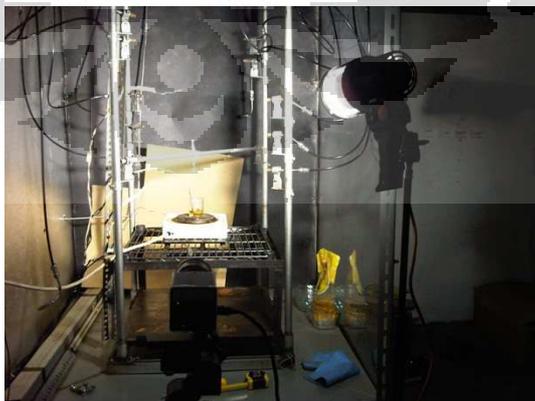
### **2.8.1 Prosedur Pengambilan Data Penetesannya Droplet pada Minyak Goreng**

Pengambilan data penetesannya droplet pada minyak goreng menggunakan jarum suntik untuk menghasilkan satu tetes droplet. Penempatan jarum suntik diletakkan di tengah diameter gelas sehingga droplet yang jatuh diharapkan akan tepat berada di tengah gelas. Sesaat sebelum droplet jatuh pada permukaan minyak, proses perekaman dimulai dan hasil rekaman di simpan dalam *laptop*. Data rekaman berupa video rekaman yang dikonversikan ke dalam kecepatan 30 fps, walaupun saat perekaman dilakukan pada kecepatan rekaman 1000 fps. Untuk memperjelas fenomena yang terjadi maka video rekaman tersebut dikonversikan ke dalam bentuk gambar sequence tiap 1 ms. Sehingga setiap percobaan akan didapatkan ribuan gambar rekaman. Percobaan dilakukan berulang pada tiap jenis minyak goreng dengan variasi ketinggian jatuh droplet yang berbeda-beda.

Adapun prosedur pengambilan datanya adalah :

1. Menyiapkan semua peralatan yang dibutuhkan, gelas dicuci bersih jangan sampai ada kotoran dan air yang menempel.

2. Pemanas elektrik di panaskan terlebih dahulu agar tidak terlalu lama dalam menaikkan temperatur minyak goreng.
3. Setelah gelas *pyrex* yang berisi dengan minyak goreng dengan volume 30 mL, lalu diletakkan di atas pemanas elektrik. Kedua termokopel diletakkan sedemikian rupa sehingga bisa mengambang diantara ketinggian minyak, sehingga bisa membaca temperatur minyak goreng yang sesungguhnya. Jarum suntik telah di tempatkan pada jarak yang telah di tentukan, dan bisa berubah-ubah sesuai dengan parameter percobaan yang diinginkan.
4. Setelah temperatur minyak goreng mulai mendekati angka  $220^{\circ}\text{C}$ , maka perubahan temperaturnya mulai direkam melalui alat data akuisisi.
5. Setelah temperatur minyak goreng mencapai  $220^{\circ}\text{C}$  maka droplet mulai diteteskan. Sebelumnya semua alat perekam gambar berupa *High Speed Video Camera* dan lampu pencahayaan dihidupkan dan sudah siap untuk merekam.
6. Setelah penetesan, fenomena setelahnya direkam selama beberapa detik (lama perekaman sesuai dengan pengaturan *lines* dan *pixel* yang sudah di atur sebelumnya).
7. Data yang berupa video camera di konversikan menjadi *sequence* gambar untuk melihat lebih jelas fenomena tiap 1/1000 detik atau 1 ms.
8. Minyak di dalam gelas di buang dan gelas dicuci bersih, kemudian gelas dikeringkan dengan kain. Setelah gelas *pyrex* kering baru bisa dimulai percobaan selanjutnya.



**Gambar 4.14** Foto pengambilan data penetesan droplet pada minyak goreng

### 2.8.2 Prosedur Pengambilan Data Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng

Pengambilan data penyemprotan kabut air pada minyak goreng dilakukan dengan meletakkan nosel yang sudah terhubung dengan sistem kabut air di atas permukaan minyak goreng dengan ketinggian 20 cm. Digunakan jarak 20 cm karena apabila digunakan jarak yang lebih dekat (10 cm) justru menimbulkan reaksi yang lebih dahsyat pada minyak goreng (sudah terbukti dalam percobaan) berupa cipratan dan letupan yang mengakibatkan berkurangnya sebagian dari volume minyak goreng keluar gelas, sedangkan apabila menggunakan jarak yang lebih jauh (30 cm) maka kabut air akan banyak tersebar di luar permukaan minyak goreng, sehingga hanya akan sedikit kabut air yang menumbuk permukaan minyak goreng. Jeda waktu penyemprotan kabut air adalah 1 detik yang diukur dengan menggunakan *stopwatch*. Kabut air didapatkan dengan memberikan tekanan sekitar 400 psi yang diperoleh dari tabung nitrogen kepada sistem kabut air, sehingga akan dihasilkan keluaran pada nosel berupa kabut air dengan diameter yang sangat kecil. Sesaat setelah penyemprotan kabut air, proses perekaman dimulai dan hasil rekaman di simpan dalam laptop. Data rekaman berupa video rekaman yang dikonversikan ke dalam kecepatan 30 fps, walaupun saat perekaman dilakukan pada kecepatan rekaman 1000 fps. Untuk memperjelas fenomena yang terjadi maka video rekaman tersebut dikonversikan ke dalam bentuk gambar sequence tiap 1 ms. Sehingga setiap percobaan akan didapatkan ribuan gambar rekaman. Percobaan dilakukan berulang pada tiap jenis minyak goreng.

Adapun prosedur pengambilan datanya adalah :

1. Menyiapkan semua peralatan yang dibutuhkan, gelas dicuci bersih jangan sampai ada kotoran dan air yang menempel.
2. Pemanas elektrik di panaskan terlebih dahulu agar tidak terlalu lama untuk menaikkan temperatur minyak goreng.
3. Setelah gelas *pyrex* yang berisi dengan minyak goreng dengan volume 30 mL, lalu diletakkan di atas pemanas elektrik. Kedua termokopel diletakkan sedemikian rupa sehingga bisa mengambang diantara ketinggian minyak,

sehingga bisa membaca temperatur minyak goreng yang sesungguhnya. Nosel telah di tempatkan pada jarak yang telah di tentukan.

4. Setelah temperatur minyak goreng mulai mendekati angka  $220^{\circ}\text{C}$ , maka perubahan temperaturnya mulai direkam melalui alat data akuisisi.
5. Setelah temperatur minyak goreng mencapai  $220^{\circ}\text{C}$  maka kabut air mulai disemprotkan. Sebelumnya semua alat perekam gambar berupa *High Speed Video Camera* dan lampu pencahayaan dihidupkan dan sudah siap untuk merekam.
6. Setelah penyemprotan, fenomena setelahnya direkam selama beberapa detik (lama perekaman sesuai dengan pengaturan *lines* dan *pixel* yang sudah di atur sebelumnya).
7. Data yang berupa video camera dikonversikan menjadi *sequence* gambar untuk melihat lebih jelas fenomena tiap  $1/1000$  detik atau 1 ms.
8. Minyak di dalam gelas di buang dan gelas dicuci bersih, kemudian gelas dikeringkan dengan kain. Setelah gelas *pyrex* kering baru bisa dimulai percobaan selanjutnya.



**Gambar 4.15** Foto pengambilan data penyemprotan kabut air pada minyak goreng

### 2.8.3 Prosedur Pengambilan Data Pengujian Temperatur Kritis Minyak Goreng Untuk Terjadi Letupan

Secara garis besar, metode pengambilan data ini sama dengan yang dilakukan saat pengambilan data fenomena penetesan droplet pada permukaan minyak goreng, hanya yang membedakan disini adalah tidak merekam fenomena yang terjadi pasca penetesannya tersebut dengan menggunakan *High Speed Video Camera*, melainkan hanya mengamati fenomena yang terjadi dengan kasat mata, karena data yang diinginkan hanyalah data kualitatif. Percobaan mulai dilakukan saat temperatur minyak goreng  $210^{\circ}\text{C}$ . Langkah-langkah dalam percobaan ini adalah dengan memvariasikan temperatur minyak goreng yaitu dengan menurunkan temperaturnya tiap  $10^{\circ}\text{C}$ , lalu diberikan satu tetes droplet pada ketinggian yang telah ditentukan yaitu 20 cm. Apabila masih terjadi letupan pada temperatur tersebut maka percobaan diulang kembali tetapi dengan menurunkan temperatur minyak goreng sebesar  $10^{\circ}\text{C}$ . Hingga pada akhirnya saat dilakukan percobaan pada temperatur tertentu dimana tidak terjadi letupan atau ledakan pada minyak goreng saat diberikan setetes droplet.

Adapun prosedur pengambilannya adalah :

1. Menyiapkan semua peralatan yang dibutuhkan, gelas dicuci bersih jangan sampai ada kotoran dan air yang menempel.
2. Pemanas elektrik di panaskan terlebih dahulu agar tidak terlalu lama dalam menaikkan temperatur minyak goreng.
3. Setelah gelas *pyrex* yang berisi dengan minyak goreng dengan volume 30 mL, lalu diletakkan di atas pemanas elektrik. Kedua termokopel diletakkan sedemikian rupa sehingga bisa mengambang diantara ketinggian minyak, sehingga bisa membaca temperatur minyak goreng yang sesungguhnya. Jarum suntik telah di tempatkan pada jarak 20 cm dari permukaan minyak goreng.
4. Setelah temperatur minyak goreng mulai mencapai temperatur yang diuji maka penetesannya droplet mulai dilakukan. Jalannya pengujian tidak direkam menggunakan camera, hanya data temperaturnya saja yang direkam melalui data akuisisi.

5. Pengamatan secara kasat mata dilakukan untuk melihat fenomena cipratan dan letupan pada minyak goreng.
6. Minyak di dalam gelas di buang dan gelas dicuci bersih, kemudian gelas dikeringkan dengan kain. Setelah gelas *pyrex* kering baru bisa dimulai percobaan selanjutnya.

#### **2.8.4 Prosedur Pengambilan Data Pengaruh Letupan Minyak Goreng Terhadap Perubahan Karakteristik Temperatur**

Setelah sebelumnya dilakukan pengambilan data berupa perekaman data fenomena letupan dan cipratan yang terjadi saat penetasan satu droplet dan kabut air pada minyak goreng, maka pada percobaan kali ini mencoba untuk mengetahui pengaruh fenomena dari letupan tersebut. Pada percobaan kali ini, mencoba untuk mengetahui dan memahami pengaruh letupan pada minyak goreng tersebut dengan mengetahui perubahan karakteristik temperatur yang terjadi saat terjadinya letupan itu. Sehingga data yang akan dihasilkan akan berupa perubahan temperatur tiap satuan waktu (detik).

Percobaan akan dilakukan pada beberapa variasi temperatur yaitu 220<sup>0</sup>C, 210<sup>0</sup>C, 190<sup>0</sup>C, 170<sup>0</sup>C, 150<sup>0</sup>C dan 140<sup>0</sup>C. Tiap temperatur percobaan ini akan dihasilkan data berupa grafik perubahan temperatur terhadap fungsi waktu. Sebagai pembandingnya, maka diambil data berupa pemanasan minyak dan pendinginannya tanpa penetasan droplet. Kemudian grafik kedua percobaan di atas diplot menjadi satu, sehingga dapat dilihat perbedaan dan fenomenanya.

Adapun prosedur pengambilan datanya adalah :

1. Menyiapkan semua peralatan yang dibutuhkan, gelas dicuci bersih jangan sampai ada kotoran dan air yang menempel.
2. Pemanas elektrik di panaskan terlebih dahulu agar tidak terlalu lama dalam menaikkan temperatur minyak goreng.
3. Setelah gelas *pyrex* yang berisi dengan minyak goreng dengan volume 30 mL, lalu diletakkan di atas pemanas elektrik. Kedua termokopel diletakkan sedemikian rupa sehingga bisa mengambang diantara ketinggian minyak, sehingga bisa membaca temperatur minyak goreng yang sesungguhnya.

Jarum suntik telah di tempatkan pada jarak 20 cm dari permukaan minyak goreng.

4. Setelah temperatur minyak goreng akan mencapai temperatur yang diuji maka pemanas elektrik dimatikan. Tujuannya adalah untuk menstabilkan temperatur pada temperatur uji yang diinginkan. Setelah temperatur stabil atau kira-kira satu menit sesudahnya maka penetes an droplet mulai dilakukan. Jalannya pengujian tidak direkam menggunakan camera, hanya data temperaturnya saja yang direkam melalui data akuisisi.
5. Minyak di dalam gelas di buang dan gelas dicuci bersih, kemudian gelas dikeringkan dengan kain. Setelah gelas *pyrex* kering baru bisa dimulai percobaan selanjutnya.
6. Untuk pengujian pemanasan minyak goreng tanpa penetes an droplet air, prosedur percobaannya hampir sama dengan prosedur no 4, tetapi tanpa adanya penetes an droplet dan data direkam selama lebih kurang dua menit.

## **BAB V**

### **HASIL DAN ANALISIS**

Pada bab ini, semua hasil pengujian berupa video dan data *logger* akan diolah ke dalam berbagai macam analisis berupa gambar, tabel, perhitungan dan grafik. Adapun pada tiap sub bab akan menjelaskan variasi pengujian yang dilakukan, hasil pengujian serta analisisnya.

#### **5.6 Hasil dan Analisis Pengujian Penetesan Droplet Air dan Kabut Air Pada Minyak Goreng**

Pada pengujian ini, akan didapatkan fenomena yang terjadi pada minyak goreng jika kita meneteskan satu tetes droplet air ke dalam minyak goreng dengan temperatur di bawah titik nyalanya (*flash point*). Selain menggunakan droplet air pengujian juga akan menggunakan kabut air yang disemprotkan pada permukaan minyak goreng dengan temperatur di bawah titik nyalanya (*flash point*). Pengujian dengan penyemprotan kabut air adalah sebagai pembanding mekanisme pemadaman dengan menggunakan sistem pemadam kabut air, sehingga nantinya kita bisa melihat perbedaan yang terjadi bila kita memadamkan api dengan menggunakan kabut air (sistem pemadam kabut air) ataupun dengan droplet (sistem pemadam api *sprinkler*). Temperatur minyak goreng ditetapkan sebesar 220<sup>0</sup>C.

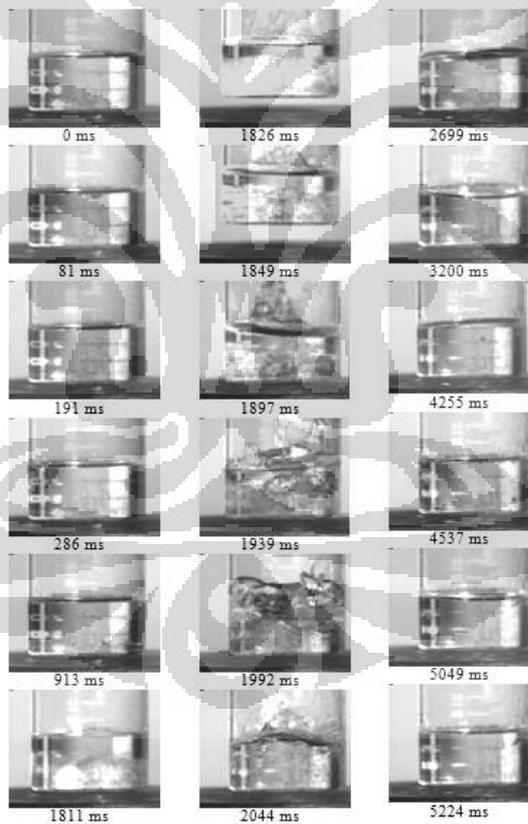
Diameter droplet air yang dihasilkan jarum suntik adalah 2 mm dengan toleransi  $\pm 0,1$  mm. Sedangkan untuk posisi peletakan *High Speed Video Camera* yang optimal adalah sekitar 1,5 m dari gelas *pyrex*. Ketinggian penetesan droplet dari permukaan minyak goreng divariasikan menjadi tiga macam, yaitu : 10 cm, 20 cm dan 30 cm. Khusus untuk kabut air hanya disemprotkan pada ketinggian 20 cm dari permukaan minyak goreng.

Minyak goreng yang digunakan berasal dari tiga jenis dan dari tiga merk yang berbeda, yaitu : minyak sawit, minyak jagung dan minyak kelapa. Disini hanya akan diberikan gambar sequence penetesan droplet air pada tiap ketinggian dari jenis minyak goreng sawit saja. Fenomena untuk minyak goreng yang lainnya adalah kurang lebih sama.

## 2.8.1 Hasil Pengujian Penetesan Droplet Air Pada Minyak Goreng Sawit

### 8.1.1.1 Hasil Pengujian Pada Ketinggian Jatuh Droplet Air 10 cm

Untuk droplet dengan diameter  $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , tinggi jatuh droplet air sebesar 10 cm, temperatur minyak goreng sawit  $220^{\circ}\text{C}$  dan volume minyak goreng sawit 30 ml didapatkan hasil *sequence* gambarnya adalah :



**Gambar 5.1** Gambar sequence dari penetesan droplet air diameter 2 mm, ketinggian 10 cm pada minyak sawit volume 30 ml dan temperatur  $220^{\circ}\text{C}$

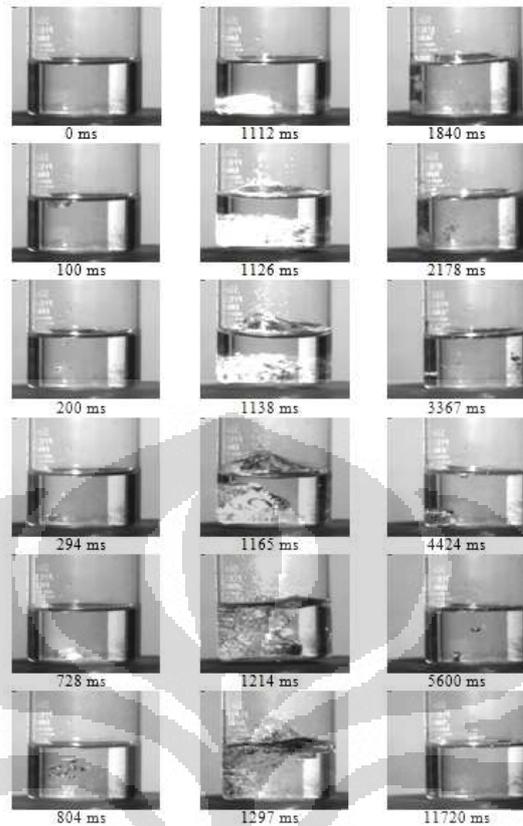
Fenomena yang terjadi dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Tetesan droplet air jatuh menumbuk permukaan minyak goreng pada detik ke 81 ms, kemudian akan terpecah menjadi dua bagian dan langsung terbenam hingga dasar gelas yang akhirnya sampai di dasar gelas saat detik ke 286 ms.
2. Setelah itu muncul beberapa gelembung udara dari dasar gelas dimana droplet berada untuk beberapa saat.
3. Saat detik ke 1811 ms terjadi letupan yang besar dan berbahaya hingga mengangkat gelas *pyrex*. Letupan bersumber dari droplet yang berada di dasar gelas tersebut.
4. Setelah terjadi letupan muncul banyak gelembung udara dengan ukuran kecil dengan intensitas yang besar hingga detik ke 2699 ms. Kemudian gelembung udara muncul kembali pada detik ke 4255 ms, 4537 ms dan 5049 ms dengan jumlah yang sedikit.

Disini tidak tampak adanya letupan kecil, hanya terjadi sekali letupan besar saja. Timbul banyak gelembung udara sesaat setelah letupan besar terjadi.

#### **8.1.1.2 Hasil Pengujian Pada Ketinggian Jatuh Droplet Air 20 cm**

Untuk droplet dengan diameter  $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , tinggi jatuh droplet air sebesar 20 cm, temperatur minyak goreng sawit  $220^{\circ}\text{C}$  dan volume minyak goreng sawit 30 ml didapatkan hasil *sequence* gambarnya adalah :



**Gambar 5.2** Gambar sequence dari penetesan droplet air diameter 2 mm, ketinggian 20 cm pada minyak sawit volume 30 ml dan temperatur 220<sup>0</sup>C

Fenomena yang terjadi adalah sebagai berikut :

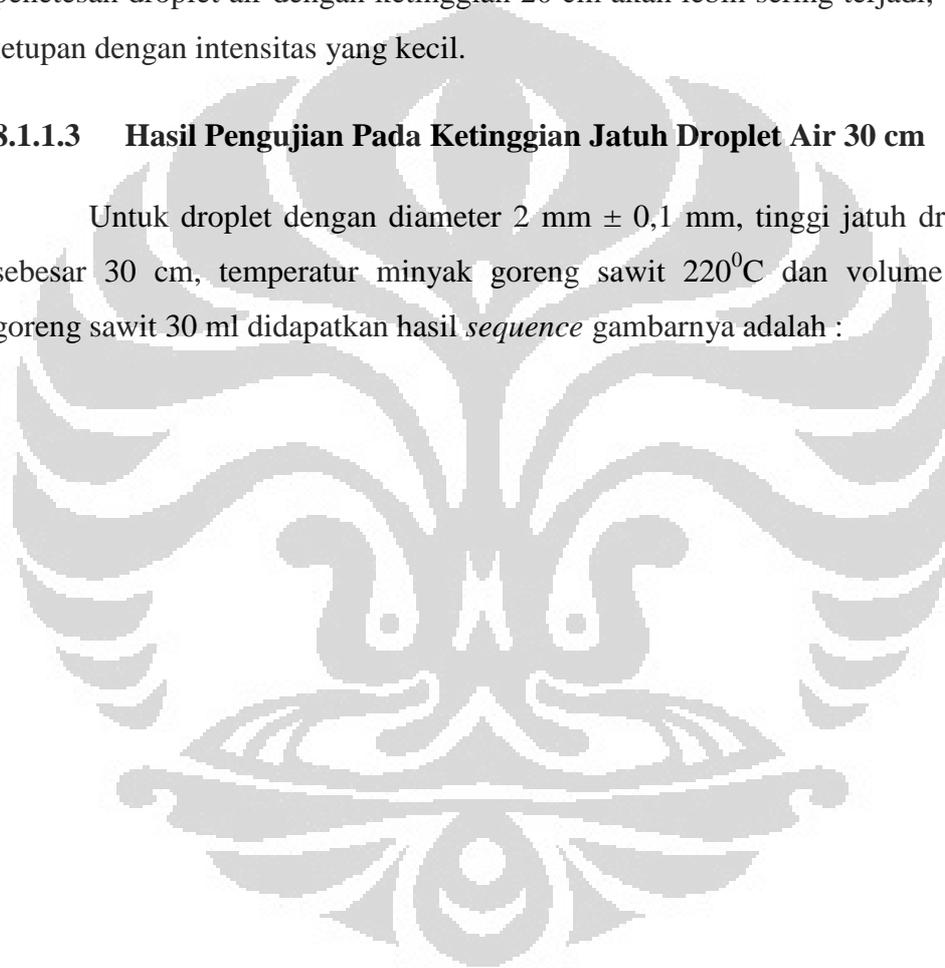
1. Tetesan droplet air jatuh menumbuk permukaan minyak goreng pada detik ke 100 ms dan langsung terpecah menjadi beberapa bagian, kemudian pecahan droplet air (droplet sekunder) terbenam hingga ke dasar gelas dan berada di dasar gelas hingga detik ke 294 ms.
2. Setelah itu timbul letupan kecil saat detik ke 728 ms dan diikuti dengan munculnya beberapa gelembung udara ke permukaan minyak.
3. Saat detik ke 1112 ms terjadi letupan yang besar dan berbahaya hingga mengangkat gelas *pyrex* dan terulang kembali saat detik ke 1214 ms. Kedua letupan itu bersumber dari droplet yang berada di dasar gelas. Disini terlihat letupan yang terjadi lebih dahsyat dibandingkan percobaan sebelumnya.

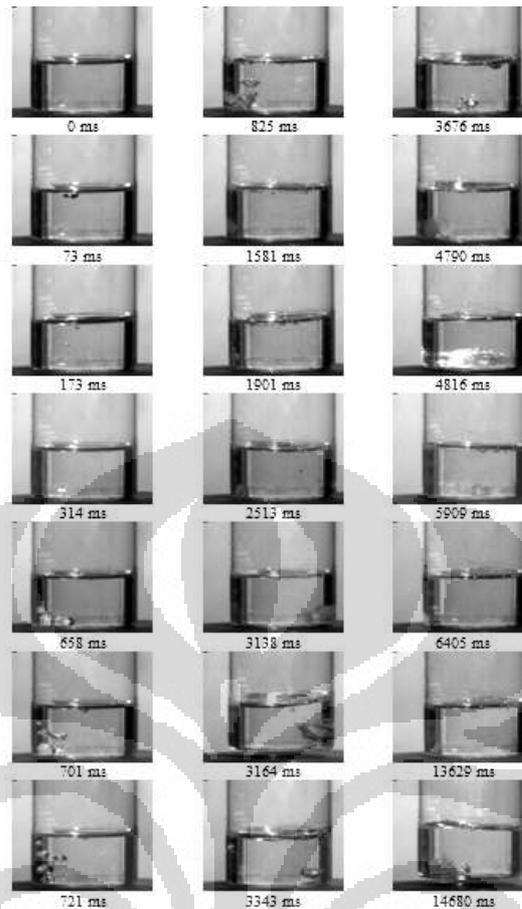
4. Kemudian muncul banyak sekali gelembung udara. Setelah itu saat detik ke 1840 ms dan detik ke 2178 ms terjadi letupan kecil pada pinggir gelas. Gelembung udara muncul kembali setelah terjadi letupan kecil tersebut.
5. Setelah detik ke 5600 ms baru muncul kembali sedikit gelembung udara di tengah diameter gelas.
6. Pada detik ke 11720 ms kembali terjadi letupan kecil di pinggir gelas.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa letupan yang terjadi pada penetasan droplet air dengan ketinggian 20 cm akan lebih sering terjadi, terutama letupan dengan intensitas yang kecil.

#### **8.1.1.3 Hasil Pengujian Pada Ketinggian Jatuh Droplet Air 30 cm**

Untuk droplet dengan diameter  $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , tinggi jatuh droplet air sebesar 30 cm, temperatur minyak goreng sawit  $220^{\circ}\text{C}$  dan volume minyak goreng sawit 30 ml didapatkan hasil *sequence* gambarnya adalah :





**Gambar 5.3** Gambar sequence dari penetesan droplet air diameter 2 mm, ketinggian 30 cm pada minyak sawit volume 30 ml dan temperatur 220<sup>0</sup>C

Fenomena yang terjadi adalah sebagai berikut :

1. Tetesan droplet air jatuh menumbuk permukaan minyak goreng pada detik ke 75 ms dan langsung terpecah menjadi beberapa bagian besar dan kecil hingga akhirnya tenggelam ke dasar gelas saat detik ke 314 ms.
2. Pada detik ke 658 ms, 701 ms, 825 ms, 1581 ms, 1901 ms, 2513 ms terjadi letupan kecil dari dasar gelas tempat droplet itu berada., lalu timbul gelembung udara yang bergerak cepat ke permukaan minyak. Munculnya gelembung udara ini masih terus terjadi hingga detik ke 2500 ms.
3. Hingga akhirnya saat detik ke 3138 ms terjadi letupan yang besar hingga mengangkat gelas pyrex di sisi yang berlawanan dengan tempat timbulnya letupan kecil sebelumnya. Setelah itu muncul gelembung udara yang lebih besar pada tempat letupan itu saat detik ke 3343 ms.

4. Pada detik ke 3676 ms muncul beberapa gelembung udara yang lebih kecil yang berasal dari tengah gelas. Kemudian diikuti munculnya beberapa gelembung udara pada sisi gelas..
5. Letupan besar dan berbahaya terjadi lagi pada detik ke 4790 ms pada sisi yang berlawanan dengan letupan besar sebelumnya dan menyebabkan gelas kembali terangkat.
6. Pada detik ke 5909 ms dan 6405 ms kembali terjadi letupan kecil yang bersumber dari tengah gelas.
7. Gelembung udara terus muncul (terutama yang berukuran besar) beberapa kali hingga detik ke 13629 ms secara merata pada semua bagian dasar gelas, dan saat detik 13629 ms muncul letupan kecil di pinggir gelas dan muncul lagi pada detik 14680 ms.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa terjadi beberapa kali letupan baik itu dengan intensitas besar ataupun kecil. Selain itu gelembung udara yang dihasilkan pun juga lebih banyak bila dibandingkan dengan penetesan pada ketinggian yang lebih kecil.

### **2.8.2 Hasil Pengujian Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng Sawit**

Pengujian penyemprotan kabut air pada permukaan minyak goreng merupakan kelanjutan dari penelitian pada Tugas Akhir sebelumnya yang menguji efektifitas pemadaman *pool fire* minyak goreng dengan menggunakan sistem pemadam api dengan kabut air (*water mist fire protection system*). Dimana pada penelitian sebelumnya telah dibuktikan bahwa sistem pemadam api dengan sistem kabut air ini efektif dalam memadamkan *pool fire* minyak goreng. Sehingga untuk melihat bagaimana interaksi yang terjadi antara kabut air dan minyak goreng maka dilakukan pengujian ini.

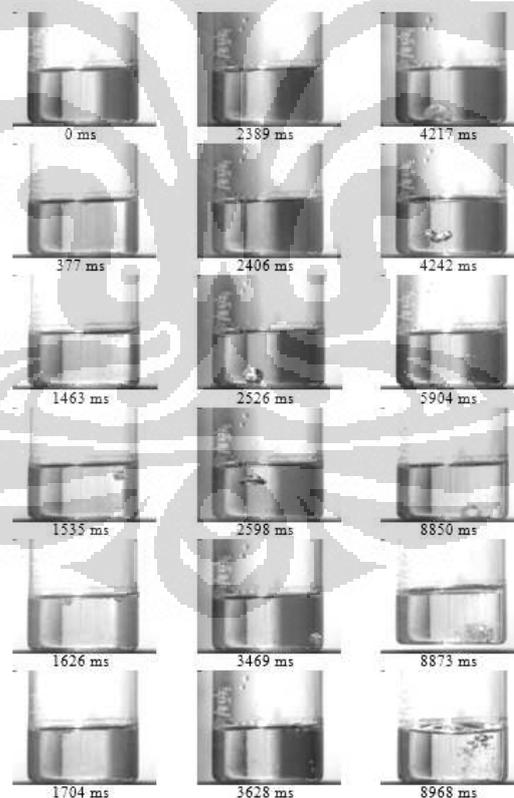
Sama seperti pengujian penetesan droplet air, pada penyemprotan kabut air ini juga dilakukan di bawah temperatur nyalanya yaitu pada temperatur 220<sup>0</sup>C. Akan tetapi yang membedakan adalah pada pengujian kali ini ketinggian penyemprotan ditetapkan pada ketinggian 20 cm saja, karena saat menguji dengan ketinggian 10 cm, justru menimbulkan efek letupan yang sangat berbahaya hingga menyebabkan berkurangnya volume minyak goreng dalam gelas pyrex.

**Universitas Indonesia**

Sedangkan pengujian pada ketinggian 30 cm justru tidak memberikan efek yang berarti karena jarak penyemprotan yang terlalu tinggi, sehingga hanya sedikit sekali *flux mass* dari kabut air yang masuk ke dalam gelas pyrex yang hanya berdiameter 45 mm. Hal ini sesuai dengan kesimpulan percobaan sebelumnya bahwa penyemprotan kabut air akan efektif jika kita mengatur jarak dan sudut penyemprotan, karena akan mempengaruhi jumlah *flux mass* yang akan bekerja memadamkan api. Sama halnya dengan pengujian penetasan droplet air, pada penyemprotan kabut air juga hanya ditampilkan untuk minyak goreng sawit saja.

#### 8.1.2.1 Pengujian Pada Minyak Goreng Sawit (*Palm Oil*)

Untuk penyemprotan kabut air yang dihasilkan dari nozel 0,3 mm dengan tekanan sistem 400 psi, tinggi penyemprotan sebesar 20 cm dari permukaan minyak goreng, temperatur minyak goreng sawit 220°C dan volume minyak goreng sawit 30 ml didapatkan hasil *sequence* gambarnya adalah :



**Gambar 5.4** Gambar sequence dari penyemprotan kabut air dari nozel diameter 0,3 mm, tekanan sistem 400 psi, ketinggian 20 cm pada minyak sawit volume 30 ml dan temperatur 220°C

Fenomena yang terjadi adalah sebagai berikut :

1. Water mist mulai jatuh di permukaan minyak goreng saat detik ke 377 ms.
2. Water mist akan mengumpul di permukaan, dan karena gaya berat nya akan turun ke dasar gelas. Akan tetapi baru sampai tengah ketinggian minyak (saat detik ke 1535 ms), kumpulan water mist (berbentuk droplet) tersebut sudah meledak (terjadi letupan kecil) sehingga akan timbul gelembung udara di tempat tersebut.
3. Sedangkan kumpulan water mist lainnya (berbentuk droplet) pada sisi pinggir gelas berhasil sampai dasar gelas (pinggir) saat detik ke 2389 ms, diam beberapa saat (sekitar 130 ms) dan setelah saat detik ke 2526 ms timbul gelembung udara yang berukuran besar. Gelembung udara juga timbul di sisi gelas saat detik ke 3469 ms. Setelah itu banyak gelembung udara kecil dan terlihat beberapa kali hingga detik ke 5904 ms.
4. Pada detik ke 4217 ms terjadi letupan kecil pada dasar gelas bagian tengah.
5. Terjadi letupan besar pada dasar gelas (pinggir) saat detik ke 8850 ms yang menyebabkan gelas terangkat.

Jika dibandingkan dengan percobaan penetesan droplet air, maka penyemprotan kabut air hanya menghasilkan letupan-letupan dengan intensitas yang kecil dan gelembung udara dalam jumlah yang banyak. Letupan besar juga sempat terjadi tetapi itupun tidak berbahaya. Fenomena yang sama pun juga terjadi saat penyemprotan pada minyak jagung dan minyak kelapa, dimana hanya terbentuk gelembung-gelembung udara baik ukuran besar dan kecil. Letupan yang terjadi pun hanya dalam intensitas yang kecil dan tidak berbahaya.

### **2.8.3 Analisis Penetesan Droplet Air dan Penyemprotan Kabut Air Pada Minyak Goreng**

Untuk mengetahui berbagai fenomena yang terjadi yang terlihat pada gambar *sequence* pengujian di atas maka perlu dilakukan suatu analisis ilmiah untuk mempermudah pemahamannya. Beberapa penelitian yang hampir sama telah dilakukan sebelumnya, namun yang membedakan adalah dalam hal media

yang ditumbuk oleh droplet air. Tetapi secara garis besar, perhitungan dan analisis teoritisnya adalah sama.

Beberapa pendekatan yang dilakukan adalah dengan mengetahui hubungan antara ketinggian penetesannya droplet dan diameter droplet yang nantinya akan mempengaruhi nilai *Webber* nya. Kemudian pengaruh tegangan permukaan masing-masing minyak goreng pada temperatur ujinya, serta pengaruh nilai *Webber* terhadap letupan dan kedalaman kawah yang terbentuk saat penetesannya droplet air. Masing-masing hal tersebut akan dijelaskan satu persatu dalam sub-bab berikut.

### 8.1.3.1 Pengaruh *Webber Number* Dalam Pengujian Penetesannya Droplet dan Kabut Air Pada Minyak Goreng

Seperti yang telah dijelaskan pada Bab II bahwa bilangan *Webber* adalah bilangan tak berdimensi yang menggambarkan rasio atau perbandingan energi kinetik droplet dengan energi permukaan (tegangan permukaan) dari droplet yang menimpa suatu permukaan (*free surface*). Sesuai dengan persamaan 2.4, bahwa dalam penetesannya droplet air dan penyemprotannya kabut air ini, bilangan *Webber* dipengaruhi oleh diameter droplet ( $D$ ) dan kecepatan droplet ( $V$ ). Dalam pengujian ini, diameter droplet merupakan variabel tetap, sehingga faktor kecepatan droplet saat menumbuk permukaan minyak goreng saja yang berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai *Webber* (Persamaan 2.4).

Semakin tinggi jarak penetesannya droplet maka kecepatan tumbukan droplet juga akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan prinsip gerak jatuh bebas yaitu :

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot g \cdot h$$

karena droplet diteteskan dari jarum suntik yang dalam keadaan diam, maka droplet air tidak memiliki kecepatan awal ( $v_0 = 0$ ), sehingga rumus di atas dapat disederhanakan menjadi :

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Dari rumus di atas dapat diketahui kecepatan tumbukan droplet air pada tiap jarak penetesannya, yaitu :

1. Ketinggian jatuh droplet 10 cm

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1} = 1,4 \text{ m/s}$$

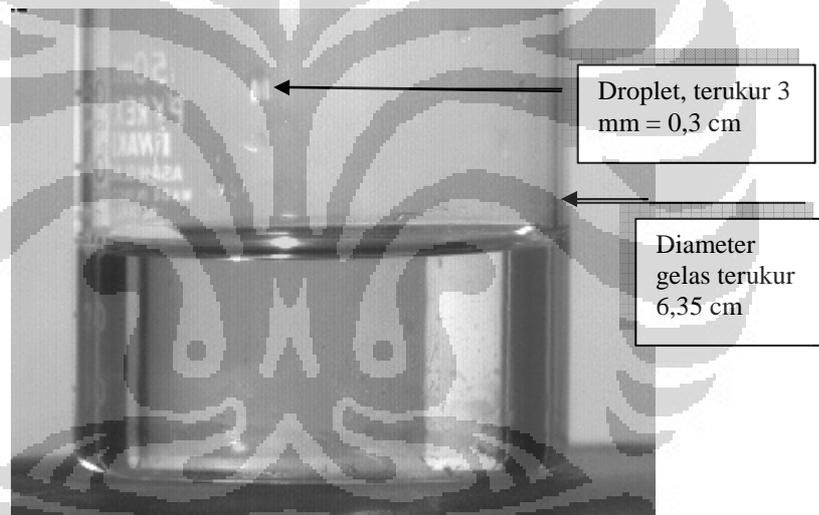
2. Ketinggian jatuh droplet 20 cm

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2} = 1,98 \text{ m/s}$$

3. Ketinggian jatuh droplet 30 cm

$$V = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3} = 2,43 \text{ m/s}$$

Sedangkan diameter droplet ( $D$ ) yang merupakan variabel tetap dihitung secara manual dengan menggunakan penggaris atau bisa juga diukur dengan cara metode perbandingan dengan diameter gelas (menggunakan komputer). Dengan cara manual (diukur dengan penggaris) diketahui bahwa diameter droplet air yang dihasilkan jarum suntik adalah 2 mm dengan toleransi  $\pm 0,1$  mm. Sedangkan pengukuran dengan metode perbandingan dapat dijelaskan sebagai berikut :



**Gambar 5.5** Perbandingan diameter gelas dengan diameter droplet secara visual pada laptop

Dengan mengetahui bahwa diameter sesungguhnya gelas *pyrex* adalah 4,5 cm, maka dapat diketahui diameter droplet sebenarnya, yaitu :

$$\frac{4,5}{D} = \frac{6,35}{0,3}$$

$$D = \frac{1,35}{6,35} = 0,21 \text{ cm} = 2,1 \text{ mm}$$

Dengan demikian nilai *Webber* pada tiap pengujian adalah :

1. Pengujian pada ketinggian jatuh droplet 10 cm

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$$

$$We = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,96 \frac{m}{s} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} m}{0,072 \frac{N}{m}} = 57,16$$

2. Pengujian pada ketinggian jatuh droplet 20 cm

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$$

$$We = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,92 \frac{m}{s} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} m}{0,072 \frac{N}{m}} = 114,35$$

3. Pengujian pada ketinggian jatuh droplet 30 cm

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$$

$$We = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 5,9 \frac{m}{s} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} m}{0,072 \frac{N}{m}} = 172,08$$

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa semakin tinggi penetesan droplet air, maka akan semakin besar pula nilai *Webber* nya. Hal ini tentunya akan berdampak ke fenomena yang terjadi pada minyak goreng pasca penetesan droplet air.

Dengan angka *Webber* sebesar di atas, sudah cukup untuk membuat minyak goreng (*pool*) yang temperaturnya sekitar 220<sup>0</sup>C untuk terpercik (*splashing*) dan bahkan meledak (*explosion*). Hal ini sesuai dengan percobaan *Monzello*, yaitu “*The Influence of liquid pool temperatur on the critical impact Weber Number for splashing*”, yang menghasilkan tabel pada gambar 2.4.

Dari tabel tersebut diketahui bahwa semakin tinggi temperatur liquid (*pool*) maka akan dibutuhkan angka *Webber* yang semakin kecil untuk terjadi percikan (*splashing*), sehingga dengan memberikan angka *Webber* yang tetap pada tiap variasi ketinggian penetesan droplet seperti yang sudah dihitung

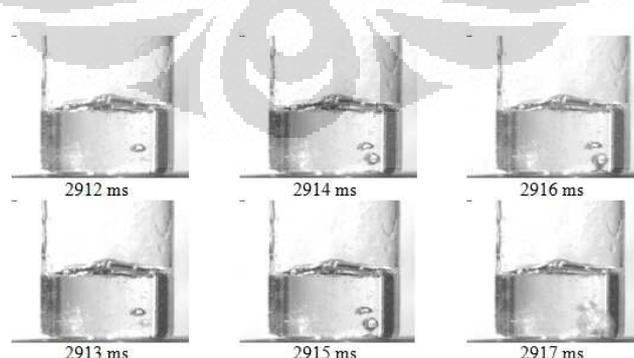
sebelumnya, maka sudah cukup untuk membuat minyak goreng pada pool untuk terpercik dan bahkan meledak.

### 8.1.3.2 Peningkatan Volume Droplet Air Sebelum Letupan.

Saat droplet air telah menembus lapisan permukaan minyak maka akan langsung menuju ke dasar gelas. Di situ droplet akan mengalami pemanasan yang sangat cepat akibat perbedaan temperatur yang sangat tinggi antara droplet dengan minyak goreng. Saat tegangan permukaan droplet tidak mampu lagi menahan gaya yang terbentuk di dalam droplet akibat pemanasan dari luar, maka droplet tersebut akan pecah dan akibatnya akan terjadi letupan pada droplet tersebut.

Mekanisme terjadinya letupan ini diawali dengan terjadinya perubahan volume berupa penambahan volume droplet tiap satuan waktu akibat dari perubahan diameter droplet tersebut. Volume akan mengalami sedikit penurunan saat menjelang letupan, hingga akhirnya droplet mencapai volume maksimal (kritis) yang akhirnya terjadilah letupan tersebut. Saat terjadi letupan ini, maka gaya yang menuju ke dasar gelas akan dipantulkan oleh permukaan pemanas elektrik. Akibatnya gelas akan terpental ke atas dengan ketinggian tertentu. Selain itu viskositas dari cairan (minyak goreng) disekitarnya juga berpengaruh terhadap ketinggian lompatan gelas ini, selain tentunya dipengaruhi oleh intensitas letupan yang terjadi.

Gambar berikut merupakan perubahan volume droplet pada penetesan terhadap minyak jagung dengan ketinggian penetesan 20 cm. Gambar sequence nya dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 5.6** *Sequence* gambar droplet saat akan meledak

Dari gambar di atas bahwa saat detik 2913 ms droplet mulai mengalami kenaikan volume, hingga akhirnya saat detik ke 2917 ms terjadi letupan karena tegangan permukaan droplet tidak mampu menahan penambahan volume yang terjadi. Volume awal droplet adalah :

$$V_0 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3$$

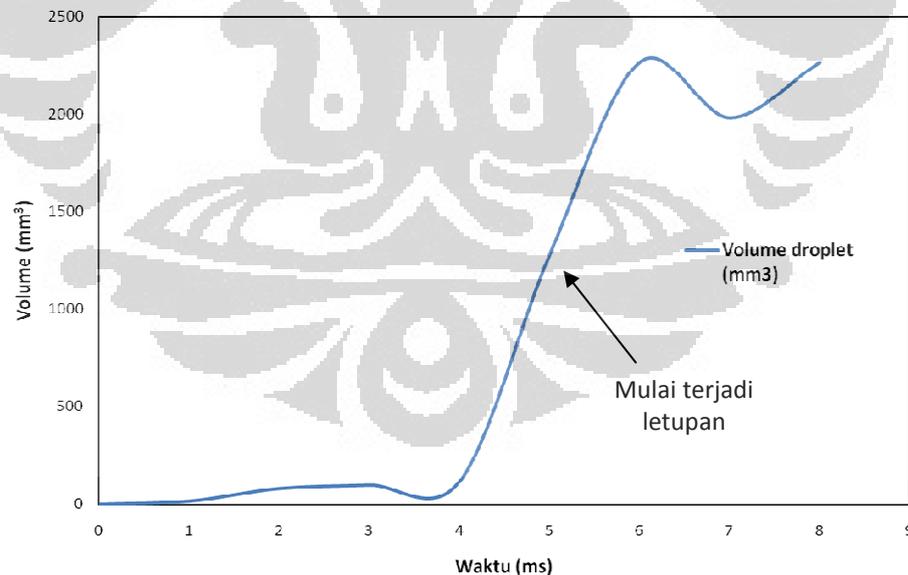
$$V_0 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{1,42 \text{ mm}}{2}\right)^3 = 1,49 \text{ mm}^3$$

Volume akhir droplet sesaat sebelum meledak adalah (setelah 4 ms) :

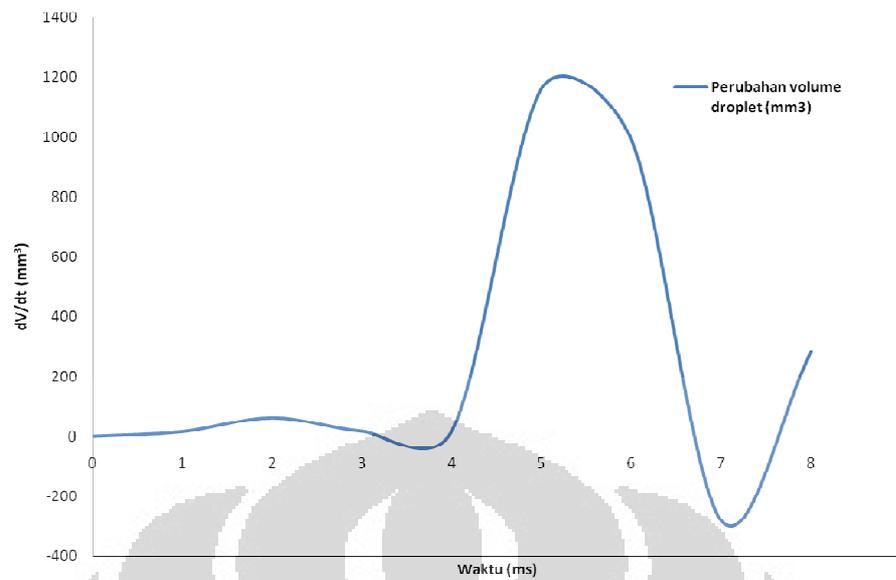
$$V_4 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_4^3$$

$$V_4 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{6,02 \text{ mm}}{2}\right)^3 = 144,38 \text{ mm}^3$$

Setelah terjadi letupan (detik ke 5 ms) terjadi peningkatan volume yang sangat tinggi. Bentuk droplet pun sudah mulai tidak simetris, sehingga sulit untuk mengamati perubahannya. Di bawah ini adalah volume droplet sesaat sebelum dan setelah meledak jika dimensinya dianggap mendekati seperti bola. Grafiknya secara lengkap dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 5.7** Kenaikan volume droplet saat terjadi letupan



**Gambar 5.8** Perubahan volume droplet saat terjadi letupan

Setelah 4 ms atau tepatnya saat detik ke 2917 ms, droplet mulai meledak. Akibatnya terjadi letupan yang mengakibatkan gelas terangkat ke atas. Pengujian kali ini mengakibatkan gelas rata-rata terangkat sekitar 2,20 mm dari permukaan pemanas elektrik.



**Gambar 5.9** Sequence gambar saat gelas terangkat pada ketinggian maksimal

### 8.1.3.3 Efek *Leidenfrost* Pada Penetesan Droplet Air Di Atas Permukaan Minyak Goreng

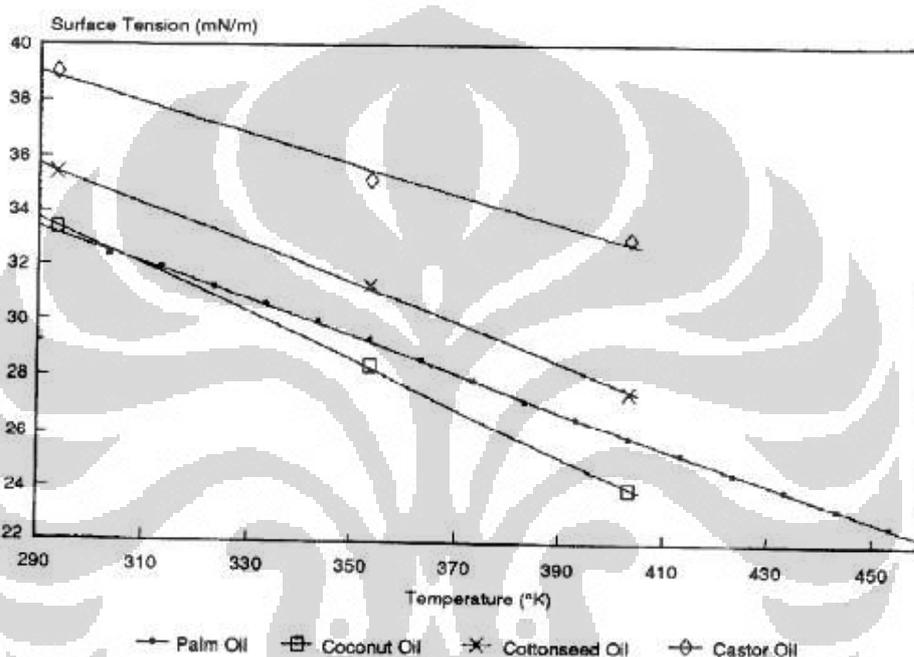
1.16 Efek *Leidenfrost* terjadi ketika suatu cairan atau droplet yang ditempatkan pada suatu massa yang memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi daripada titik didih cairan atau droplet ( $T_{sat}$ ) tersebut. Sama halnya seperti pada kasus penetesan droplet pada minyak goreng ini, dimana temperatur minyak goreng ( $T_s$ ) mencapai  $220^{\circ}\text{C}$  dan temperatur didih droplet ( $T_{sat}$ ) adalah  $100^{\circ}\text{C}$  pada tekanan 1 atm. Disini selisih antara  $T_s$  dengan  $T_{sat}$  adalah  $120^{\circ}\text{C}$ . Sesuai kurva pendidihan air pada tekanan 1 atm (gambar 2.15) maka akan terjadi efek *Ledenfrost* dengan metode pendidihan adalah *Film Boiling* dan pada kondisi ini *surface heat flux* ( $q_s''$ ) memiliki nilai yang terkecil.

Sesuai penjelasan di atas, saat droplet yang mulai menembus kedalaman minyak goreng tidak akan langsung menguap seluruhnya, karena akan timbul lapisan uap (*layer of vapor*) yang menyelimuti droplet tersebut (gambar 2.16). Hal ini menyebabkan perpindahan kalor dari minyak goreng ke dalam droplet akan terhambat yang ditandai dengan nilai *surface heat flux* ( $q_s''$ ) yang paling kecil, sehingga menghambat droplet air untuk mendidih secara cepat. Gelembung-gelembung udara yang muncul kemungkinan juga berasal dari lapisan-lapisan uap ini yang terlepas dari droplet. Akhirnya perpindahan kalor pun terjadi secara konduksi dengan lapisan uap tersebut sebagai ketebalan atau jarak perpindahan panasnya ( $dx$ ). Dengan demikian akan terjadi semacam *ignition delay* selama proses perpindahan kalor secara konduksi, yang ditandai dengan peningkatan volume droplet air dengan jeda waktu tertentu.

Jika hal ini berlangsung secara terus menerus, maka temperatur di dalam droplet pun akan mencapai titik didihnya ( $100^{\circ}\text{C}$ ), yang akhirnya menyebabkan droplet berubah fase menjadi uap. Jika hal ini disertai dengan pelepasan energi yang besar maka akan terjadi letupan yang dahsyat. Kadang energi yang dilepaskan tidak cukup besar sehingga hanya akan menghasilkan gelembung udara (*vapor*) tanpa disertai adanya letupan. Tegangan permukaan droplet saat ini pun sudah tidak mampu lagi menahan tekanan akibat laju pelepasan energi yang terjadi hingga terjadilah letupan-letupan itu.

### 8.1.3.4 Pengaruh Tegangan Permukaan (*Surface Tension*) Minyak Goreng Dalam Pengujian Penetasan Droplet dan Kabut Air Pada Minyak Goreng

Pada eksperiment lainnya yang dilakukan oleh *Flingoh, C H OH dan Chong Chiew Let* yang berjudul “*Surface Tension of Palm Oil, Palm Olein and Palm Stearin*” didapatkan data tegangan permukaan dari tiap-tiap minyak goreng dengan beberapa variasi temperatur[24].



**Gambar 5.10** Tegangan permukaan pada beberapa jenis minyak goreng

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa kecenderungan tegangan permukaan pada beberapa jenis minyak goreng akan turun seiring dengan naiknya temperatur. Sebagai contoh pada minyak sawit (*palm oil*) saat temperature 450 K = 177°C diketahui bahwa  $\sigma = \pm 23$  mN/m. Bila dibandingkan dengan tegangan permukaan air (pada droplet) yang digunakan dalam pengujian saat temperatur ruangan yang sebesar  $\sigma = 0,072$  N/m = 72 mN/m maka didapatkan bahwa tegangan permukaan droplet air lebih besar dari minyak goreng (minyak sawit) pada temperature 177°C. Hal ini pun akan sama pada kondisi eksperiment yang dilakukan yaitu pada temperatur 220°C, dan dapat dipastikan tegangan permukaan droplet air akan lebih tinggi dari tegangan permukaan minyak sawit

pada temperatur  $220^{\circ}\text{C}$ . Sehingga butiran droplet yang jatuh akan dapat menembus permukaan minyak dan akan tenggelam dalam lapisan minyak goreng.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa jika tegangan permukaan droplet air lebih tinggi maka droplet akan menembus lapisan permukaan minyak goreng, sebaliknya jika tegangan permukaan air lebih kecil maka air tersebut akan terpecah, seperti saat droplet air menumbuk permukaan padat.

### 8.1.3.5 Analisis Terjadinya Kawah, Cipratan Serta Letupan Minyak Goreng Saat Penetasan Droplet Air

Apabila kita meneteskan droplet air pada minyak goreng maka pertama kali akan timbul cipratan tepat di tempat terjadinya tumbukan (*impact*) antara droplet air dengan permukaan minyak goreng. Urutan peristiwanya secara detail dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Droplet air yang menumbuk permukaan minyak goreng yang memiliki energi kinetik serta memiliki nilai *Webber* tertentu akan terus bergerak ke dalam lapisan minyak goreng dengan berusaha menembus tegangan permukaan minyak goreng.
2. Akibatnya akan terbentuk kawah (*crater*) tepat di tempat jatuhnya droplet air tadi. Kedalaman kawah yang terjadi akan berbeda-beda sesuai dengan angka *Webber* dan energi kinetik droplet serta temperatur minyak goreng.

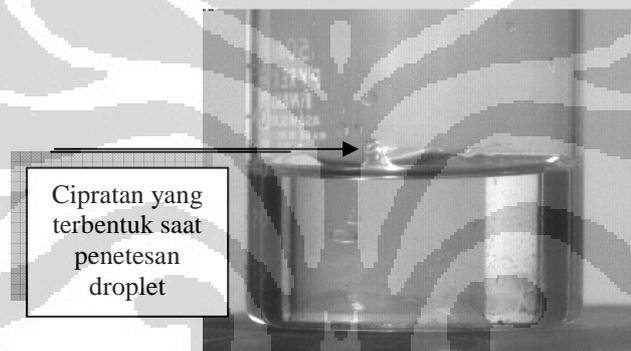


**Gambar 5.11** Kawah yang terbentuk setelah droplet menumbuk permukaan minyak goreng

3. Saat kawah mencapai kedalaman maksimum, lalu fluida (minyak goreng) akan mengisi ruang kosong pada kawah ini. Saat dimana kedalaman kawah mencapai maksimal adalah saat dimana tegangan permukaan

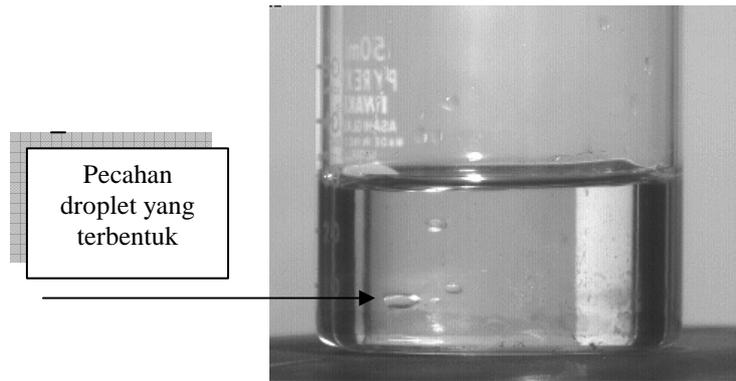
minyak goreng tidak mampu lagi menahan energi kinetik yang dimiliki oleh droplet, sehingga akan terpecah. Dengan demikian droplet air dapat menembus lapisan permukaan minyak. Saat droplet air mampu menembus lapisan permukaan minyak (saat kedalaman maksimal) itulah akan terbentuk gaya jet pada dasar kawah ini yang kemudian menyebabkan gaya dorong pada minyak yang mendorongnya ke permukaan minyak goreng. Dan pada saat ini pula droplet akan terfragmentasi menjadi beberapa bagian (droplet sekunder).

4. Akhirnya, setelah melewati permukaan minyak goreng, maka terjadilah fenomena yang disebut dengan cipratan (*splashing*). Ketinggian cipratan yang terbentuk pun dipengaruhi oleh energi kinetik droplet, nilai *Webber* droplet dan temperatur minyak goreng.



**Gambar 5.12** Cipratan yang terbentuk setelah droplet menumbuk permukaan minyak goreng

Setelah itu droplet yang menembus lapisan minyak goreng itu akan terfragmentasi menjadi beberapa bagian. Untuk ketinggian jatuh yang lebih tinggi biasanya menyebabkan droplet terpecah menjadi lebih banyak bagian droplet sekunder.



**Gambar 5.13** Pecahan droplet yang terbentuk setelah droplet menumbuk permukaan minyak goreng

Sudah dijelaskan sebelumnya bahwa ketinggian penetesan droplet air berpengaruh terhadap besarnya kedalaman dan tingginya cipratan yang terjadi. Hal ini dikarenakan droplet diteteskan dari tempat yang lebih tinggi akan memiliki nilai *Webber* yang lebih tinggi. Dengan ketinggian penetesan yang lebih besar maka akan memiliki energi kinetik ( $E_{total}$ ) yang lebih besar, sehingga memiliki kedalaman kawah yang lebih besar karena  $E_{crater}$  semakin bertambah. Perumusannya adalah :

$$E_{total} = E_{crater} + E_{dissipated}$$

Energi total droplet air saat menumbuk permukaan minyak goreng dari ketinggian  $h = 20$  cm adalah :

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

dimana :  $m = V_{droplet} \cdot \rho_{air}$  diameter droplet = 2,1 mm (  $r = 1,05$  mm)

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$m = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1000$$

$$m = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$$

Sehingga energi kinetik ( $E_{total}$ ) pada tiap ketinggian penetesan droplet adalah :

1. Untuk  $h = 10$  cm,  $v = 1,4$  m/s

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \left(1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$E_k = 4,753 \cdot 10^{-6} \text{ Joule}$$

2. Untuk  $h = 20$  cm,  $v = 1,98$  m/s

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \left(1,98 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$E_k = 9,51 \cdot 10^{-6} \text{ Joule}$$

3. Untuk  $h = 30$  cm,  $v = 2,43$  m/s

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \left(2,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$E_k = 1,43 \cdot 10^{-5} \text{ Joule}$$

Pada temperatur minyak goreng sawit yang sama, perbedaan ketinggian penetesan droplet akan menyebabkan perbedaan dalam hal kedalaman kawah maksimum yang terjadi. Hal ini disebabkan karena perbedaan energi kinetik tadi. Untuk mengukurnya, digunakan metode perbandingan dengan *software* editing gambar, yaitu dengan perumusan :

$$\frac{\text{Ketinggian minyak 30 ml sesungguhnya}}{\text{Kedalaman kawah max.}} = \frac{\text{Kedalaman minyak terukur}}{\text{Kedalaman kawah terukur}}$$

Dari pengukuran yang dilakukan terhadap ketinggian minyak goreng dengan volume 30 ml yang berada dalam gelas *pyrex* dengan diameter 45 mm didapatkan ketinggian minyak yang sesungguhnya adalah 22 mm.

Sehingga :

1. Untuk ketinggian penetasan droplet 10 cm pada minyak goreng sawit.

Kedalaman minyak terukur adalah 69 mm, kedalaman kawah terukur adalah 11 mm, sehingga kedalaman kawah maksimalnya :

$$\frac{22}{R} = \frac{69}{11}$$

$$R = \frac{242}{69} = 3,507 \text{ mm} = 0,0035 \text{ m}$$

2. Untuk ketinggian penetasan droplet 20 cm pada minyak goreng sawit.

Kedalaman minyak terukur adalah 65 mm, kedalaman kawah terukur adalah 14 mm, sehingga kedalaman kawah maksimalnya :

$$\frac{22}{R} = \frac{65}{14}$$

$$R = \frac{308}{65} = 4,738 \text{ mm} = 0,0047 \text{ m}$$

3. Untuk ketinggian penetasan droplet 30 cm pada minyak goreng sawit.

Kedalaman minyak terukur adalah 65 mm, kedalaman kawah terukur adalah 16 mm, sehingga kedalaman kawah maksimalnya :

$$\frac{22}{R} = \frac{65}{16}$$

$$R = \frac{352}{65} = 5,415 \text{ mm} = 0,0054 \text{ m}$$

Dari analisis perhitungan di atas jelas bahwa semakin tinggi energi kinetik nya ( $E_{total}$ ), maka kedalaman maksimum kawah yang terbentuk akan semakin besar.

Semakin tinggi pemanasan minyak goreng, menyebabkan semakin besar energi *dissipated* nya, karena adanya pergerakan molekul cairan dan gaya *Bouyancy* yang semakin besar, akibatnya energi *crater* akan semakin kecil sehingga kawah yang terbentuk akan semakin dangkal. Dengan demikian energi yang diperlukan untuk mengangkat cairan pada kawah ke permukaan minyak pun ( $W$ ) juga akan semakin kecil. Dalam percobaan ini temperatur minyak goreng ditetapkan 220<sup>0</sup>C, sehingga faktor yang menentukan kedalaman hanya ketinggian penetasan dropletnya. Dengan perbedaan kedalaman maksimum kawah yang terbentuk, maka berbeda pula energi yang dibutuhkan untuk terjadi cipratan pada tiap ketinggian penetasan.

Secara matematis, *jet power* atau energi yang diperlukan untuk mengangkat cairan pada kawah ke permukaan ( $W$ ) pada masing-masing kedalaman maksimum kawah dihitung sebagai berikut.

1. Pada kedalaman maksimum kawah  $R = 0,0035$  m, ketinggian penetasan droplet 10 cm

$$W = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho \cdot R^4}{4}$$

$\rho$  minyak goreng sawit saat  $T = 220^0\text{C}$  adalah  $803,1 \text{ kg/m}^3$

$$W = \frac{3,14 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 803,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,0035 \text{ m})^4}{4}$$

$$W = 9,355 \cdot 10^{-7} \text{ Joule}$$

2. Pada kedalaman maksimum kawah  $R = 0,0047$  m, ketinggian penetasan droplet 20 cm

$$W = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho \cdot R^4}{4}$$

$\rho$  minyak goreng sawit saat  $T = 220^0\text{C}$  adalah  $803,1 \text{ kg/m}^3$

$$W = \frac{3,14 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 803,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,0047 \text{ m})^4}{4}$$

$$W = 3,02 \cdot 10^{-6} \text{ Joule}$$

3. Pada kedalaman maksimum kawah  $R = 0,0054$  m, ketinggian penetasan droplet 30 cm

$$W = \frac{\pi \cdot g \cdot \rho \cdot R^4}{4}$$

$\rho$  minyak goreng sawit saat  $T = 220^0\text{C}$  adalah  $803,1 \text{ kg/m}^3$

$$W = \frac{3,14 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 803,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,0054 \text{ m})^4}{4}$$

$$W = 5,26 \cdot 10^{-6} \text{ Joule}$$

Dari perhitungan di atas, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi jarak penetasan droplet, maka kedalaman maksimum kawah ( $R$ ) akan semakin besar. Akibatnya dibutuhkan energi yang lebih besar untuk mengangkat cairan dalam kawah ( $W$  semakin besar). Jika nilainya dibandingkan dengan nilai  $E_{kinetik}$  yang

dimiliki pada tiap penetesannya, maka energi yang diperlukan untuk mengangkat cairan pada kawah untuk ke permukaan ini ( $W$ ) akan selalu lebih kecil. Hal ini disebabkan karena adanya energi yang hilang (*dissipated*) saat droplet menumbuk lapisan permukaan minyak goreng.

Dengan anggapan bahwa semakin tinggi temperatur maka semakin dangkal kedalaman kawah yang terbentuk, maka semakin tinggi temperatur minyak goreng akan semakin mudah terciprat. Hal inilah yang menyebabkan nilai *Webber* kritis untuk terjadinya cipratan akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya temperatur minyak goreng, karena pada temperatur minyak goreng yang tinggi hanya dibutuhkan sedikit energi kinetik atau nilai *Webber* untuk bisa menghasilkan cipratan dan letupan.

Kemudian droplet air yang mampu menembus lapisan minyak goreng itu akan tenggelam ke dasar gelas. Hal ini karena droplet air tersebut memiliki massa jenis yang lebih tinggi dari pada massa jenis minyak goreng pada temperatur  $220^{\circ}\text{C}$ . Perbedaan temperatur yang sangat tinggi antara minyak goreng dengan droplet air menyebabkan terjadinya perpindahan panas dari minyak goreng ke droplet air, yang menyebabkan droplet air akan bertambah panas. Hingga akhirnya saat tegangan permukaan droplet air tidak mampu lagi menahan panas dan energi yang terbentuk di dalam droplet sehingga akan terpecah. Akibatnya akan terjadi letupan yang bersumber dari droplet air.

Letupan yang terjadi kadang mengakibatkan gelas terangkat. Hal ini disebabkan karena dasar gelas berada di permukaan padat. Seperti yang kita tahu, bahwa letupan ini menyebar ke segala arah. Arah letupan yang menuju ke bawah akan menyebabkan dinding dasar gelas terpantul karena mengalami tumbukan dengan permukaan padat (pemanas elektrik). Akibatnya gelas terangkat (terpental) ke arah yang lebih bebas (atas atau samping).

Secara umum, dari gambar *sequence* pengujian di atas, tampak bahwa pada penetesannya dengan ketinggian 30 cm pada masing-masing minyak goreng akan menghasilkan jumlah letupan (besar atau kecil) yang lebih banyak intensitasnya dari pada pengujian dengan ketinggian penetesannya yang lebih kecil. Apabila dibuat dalam bentuk tabel tentang fenomena ini, maka dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 5.1** Karakteristik letupan berbagai jenis minyak goreng pada penetasan droplet air

No.	Jenis Minyak	Ketinggian droplet jatuh	Kec. droplet saat impact	Jeda terjadinya letupan (sejak droplet impact dengan permukaan minyak)		Jumlah letupan	
				Letupan kecil	Letupan besar	Kecil	Besar
1	Minyak Sawit	10 cm	1,4 m/s	-	1730 ms	-	1
		20 cm	1,98 m/s	628 ms	1012 ms	4	2
		30 cm	2,43 m/s	583 ms	3063 ms	10	2
2	Minyak Jagung	10 cm	1,4 m/s	1061 ms	967 ms	8	2
		20 cm	1,98 m/s	1286 ms	2095 ms	4	3
		30 cm	2,43 m/s	6762 ms	722 ms	3	4
3	Minyak Kelapa	10 cm	1,4 m/s	470 ms	827 ms	2	1
		20 cm	1,98 m/s	361 ms	2568 ms	5	1
		30 cm	2,43 m/s	2441 ms	1196 ms	2	2

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa letupan baik yang besar ataupun yang kecil lebih sering terjadi pada penetasan ke dalam minyak jagung dibandingkan yang lain. Untuk reaksi letupan pun berlangsung sangat cepat setelah penetasan. Untuk penetasan droplet pada minyak goreng, semua letupan terjadi pada dasar gelas (jika terjadi kontak antara zat padat dan zat cair), akan tetapi pada penyemprotan kabut air letupan bisa terjadi pada tengah ketinggian gelas (tanpa terjadi kontak antara zat padat dan zat cair). Hal ini bertentangan dengan percobaan *Monzello* sebelumnya yang menyatakan letupan hanya akan terjadi jika ada kontak diantara dua zat yang berbeda seperti zat padat dan zat cair.

Secara umum, jika dibandingkan dengan penetasan droplet pada permukaan minyak goreng, maka pada penyemprotan kabut air menghasilkan lebih sedikit fenomena letupan. Letupan yang terjadi pun adalah letupan kecil dan tidak berbahaya. Jadi hal inilah yang mendasari bahwa penggunaan sistem pemadam kabut air adalah tidak berbahaya, karena tidak menimbulkan reaksi letupan saat terjadi interaksi antara kabut air dengan minyak goreng ataupun dengan api nya, asal penyemprotan dilakukan pada jarak yang optimum dan jangan terlalu dekat dengan sumber api (*pool fire*).

## 5.2 Hasil dan Analisis Pengujian Temperatur Kritis Minyak Goreng Untuk Terjadi Letupan

Seperti yang telah dilakukan pada percobaan sebelumnya, bahwa jika suatu minyak goreng dengan temperatur yang tinggi diteteskan droplet air, maka akan terjadi fenomena berupa letupan pada minyak goreng tersebut. Sebelumnya telah dijelaskan bahwa semakin tinggi temperatur minyak goreng maka letupan yang terjadi akan semakin besar karena minyak goreng memiliki kapasitas panas yang cukup tinggi yang mengakibatkan energi letupan yang lebih besar pada droplet yang berada di dalam minyak goreng tersebut. Dalam percobaan kali ini ingin diketahui temperatur minimum minyak goreng untuk terjadi letupan. Pengamatan dilakukan pada beberapa variasi temperatur mulai dari 220<sup>0</sup>C dan terus diturunkan. Ketinggian penetes droplet ditetapkan pada ketinggian 20 cm. Dengan demikian angka *Webber* nya akan tetap yaitu dikisaran angka 114,35. Data yang diperoleh ada pada tabel 5.2 berikut.

**Tabel 5.2** Data pengujian temperatur kritis pada penetes droplet dengan ketinggian 20 cm pada berbagai jenis minyak goreng

Temp. ( <sup>0</sup> C)	Minyak Sawit		Minyak Jagung		Minyak Kelapa	
	Cipratan	Letupan	Cipratan	Letupan	Cipratan	Letupan
220	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
210	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
200	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
190	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
180	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
170	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
160	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada	Ada
150	Ada	<b>Tidak</b>	Ada	Ada	Ada	Ada
140	Ada	<b>Tidak</b>	Ada	<b>Tidak</b>	Ada	<b>Tidak</b>

Jika mengacu pada kurva pendidihan air pada tekanan 1 atm (Gambar 2.15), maka  $\Delta T_e$  akan berada pada daerah transisi, dimana terdapat formasi gelembung

dan lapisan uap nya. Sehingga masih memungkinkan untuk terjadinya letupan droplet, walaupun dengan intensitas yang lebih kecil. Hingga pada saat temperatur mencapai  $140^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_e = 40^{\circ}\text{C}$ ) maka sudah semakin mendekati pendidihan *nucleate* sehingga sudah tidak terbentuk lagi lapisan uap pada droplet sehingga droplet akan cepat menguap tanpa mengalami letupan. Hanya akan muncul gelembung-gelembung udara akibat proses penguapan droplet air. Sementara cipratan masih akan terjadi pada temperatur ini karena nilai atau besarnya cipratan berbanding terbalik dengan letupan.

### **5.3 Hasil dan Analisis Pengaruh Letupan Minyak Goreng Terhadap Perubahan Karakteristik Temperatur**

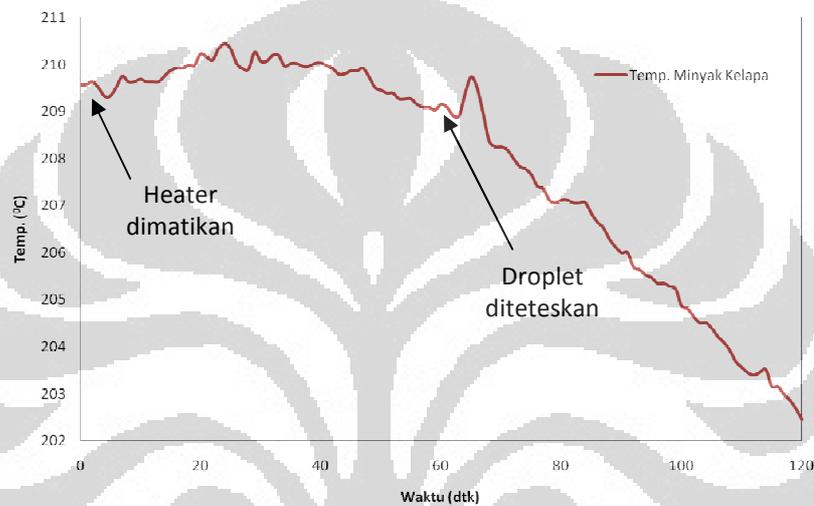
Pengujian ini adalah pengembangan dari pengujian sebelumnya yaitu pengujian temperatur kritis minyak goreng untuk terjadi letupan. Pada pengujian ini mencoba untuk mengamati fenomena letupan minyak goreng saat penetesannya droplet pada berbagai variasi temperatur di ketiga jenis minyak goreng. Disini akan dicari pengaruh letupan terhadap karakteristik perubahan temperatur yang terekam dalam data logger. Untuk itu hasil dari pengujian ini berupa grafik temperatur terhadap waktu. Sebagai pembandingan maka data akan dibandingkan dengan karakteristik temperatur saat pemanasan minyak goreng dengan pemanas elektrik tanpa adanya penetesannya droplet air. Sebagai acuan data pembandingan adalah grafik yang diperoleh dari penelitian lainnya yaitu berupa penetesannya droplet air pada media padat (*solid*). Karena banyaknya data yang diperoleh maka untuk mewakilinya akan diberikan data pengujian pada minyak goreng kelapa saja.

#### **2.8.1 Karakteristik Perubahan Temperatur Minyak Jagung Saat Penetesannya Droplet**

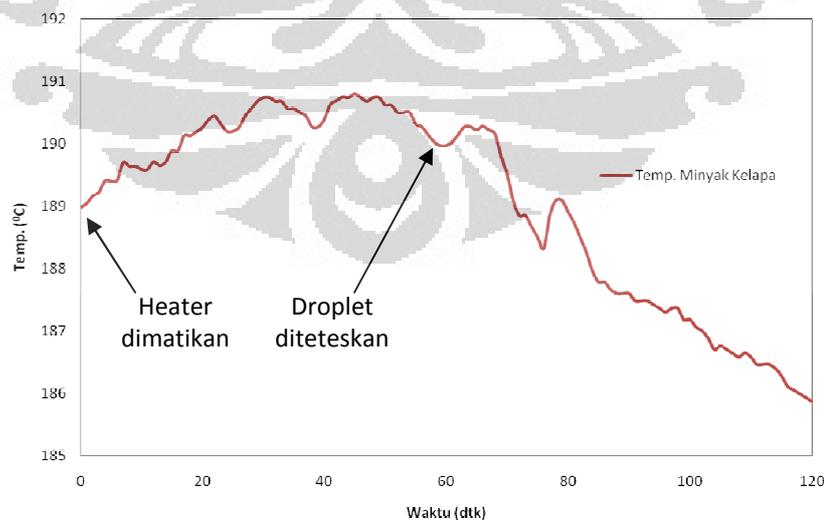
Dalam pengujian ini minyak kelapa dalam gelas *pyrex* dipanaskan hingga mencapai temperatur ujinya. Setelah mendekati temperatur uji, maka temperatur dipertahankan stabil pada temperatur uji dengan cara mematikan pemanas

elektriknya satu menit sebelum penetasan, sehingga diasumsikan tidak ada penambahan kalor pada minyak goreng saat waktu penetasan.

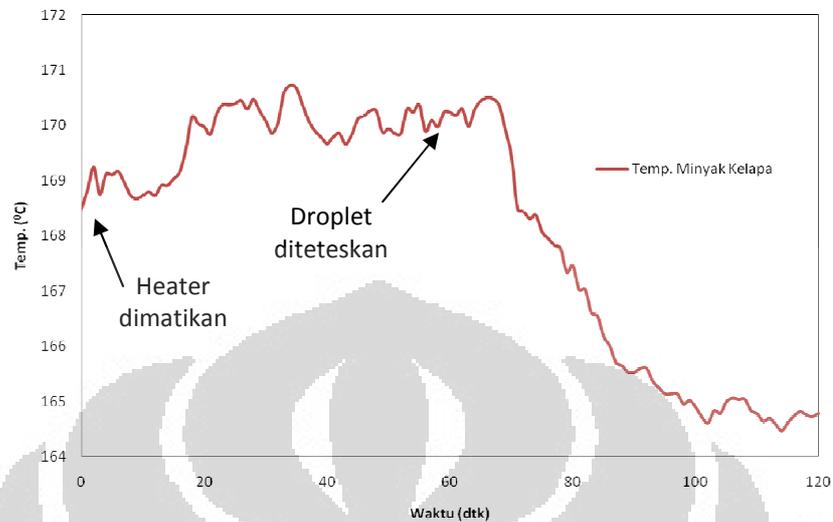
Semenit setelah mematikan pemanas elektrik, droplet air dengan diameter  $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  diteteskan dari ketinggian 20 cm. Karakteristik temperatur mulai dari saat mematikan pemanas elektrik, penetasan droplet hingga semenit setelahnya akan direkam oleh data *logger* dan diplot ke dalam sebuah grafik. Adapun karakteristik grafiknya pada tiap temperatur pengujian yaitu  $210^{\circ}\text{C}$ ,  $190^{\circ}\text{C}$ ,  $170^{\circ}\text{C}$  dan  $150^{\circ}\text{C}$  dapat dilihat pada gambar berikut.



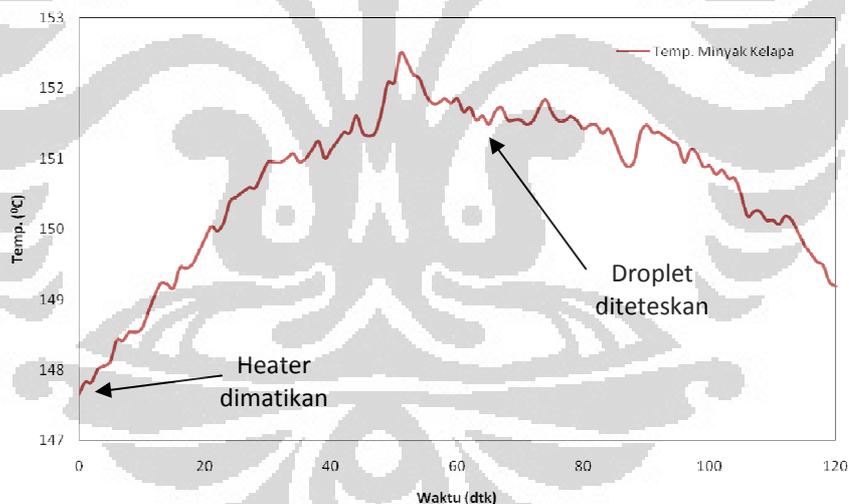
**Gambar 5.14** Grafik temperatur dan waktu saat penetasan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur  $210^{\circ}\text{C}$



**Gambar 5.15** Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur  $190^{\circ}\text{C}$



**Gambar 5.16** Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur  $170^{\circ}\text{C}$



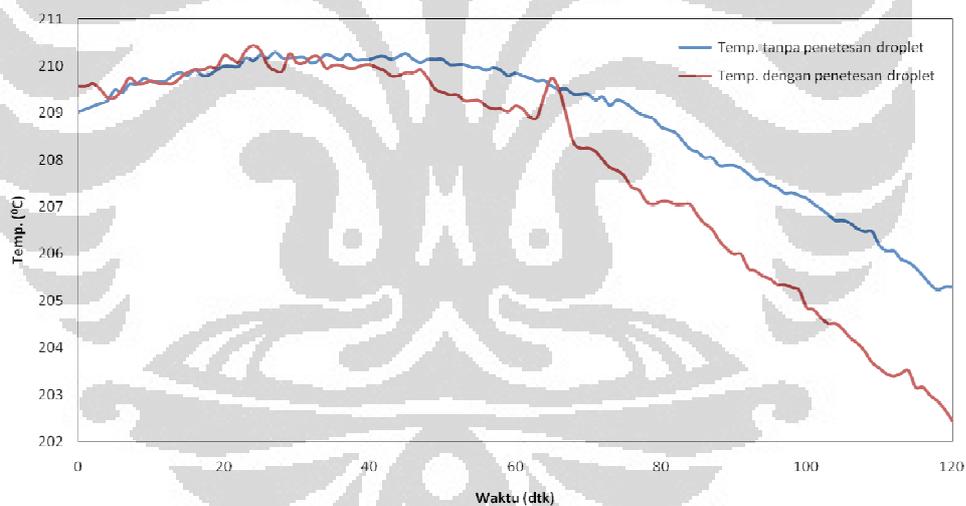
**Gambar 5.17** Grafik temperatur dan waktu saat penetesan droplet air pada minyak kelapa dengan temperatur  $150^{\circ}\text{C}$

Dari beberapa grafik di atas kita bisa melihat bahwa sesaat setelah penetesan droplet akan terjadi fluktuasi temperatur, dimana untuk beberapa saat temperatur akan turun dan kemudian naik dengan selisih yang lebih besar dari selisih-selisih sebelumnya. Jadi saat droplet air memasuki lapisan minyak goreng,

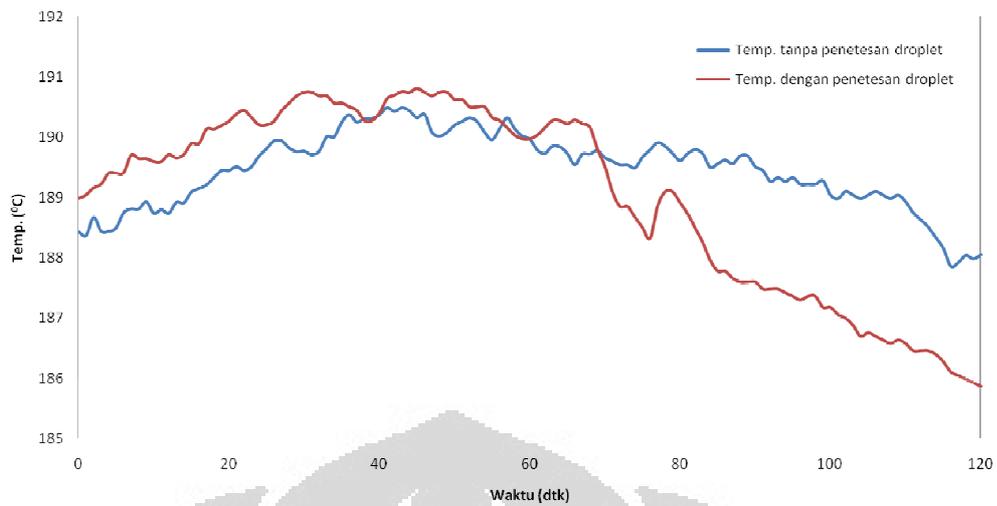
**Universitas Indonesia**

maka akan terjadi proses perpindahan panas dari minyak goreng ke droplet air. Hal inilah akan menyebabkan adanya kalor berpindah dari minyak goreng ke droplet air sehingga temperatur minyak goreng akan turun sesaat. Kemudian saat terjadi letupan pada minyak goreng, akan terjadi kenaikan tekanan sehingga temperatur pun akan mengalami kenaikan karena dalam proses ini akan melepaskan kalor (energi). Setelah itu temperatur akan cepat turun karena ada sejumlah kalor pada minyak goreng telah hilang akibat proses pemanasan droplet yang akhirnya menyebabkan proses letupan itu.

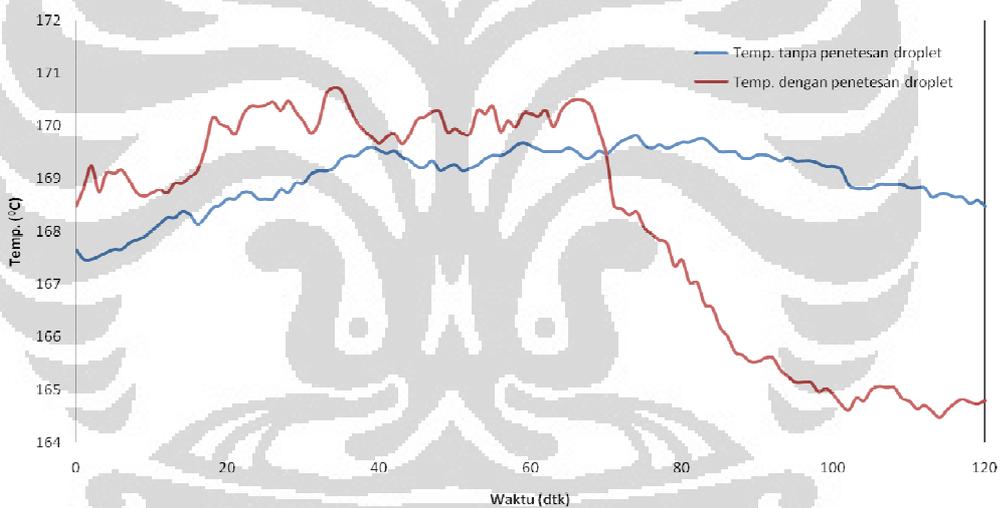
Jika kita bandingkan dengan trend grafik tanpa penetesan droplet, maka akan terlihat bahwa sesaat setelah terjadi penetesan akan terjadi gejolak temperatur dan setelahnya akan terlihat penurunan temperatur yang lebih cepat dibandingkan dengan tanpa adanya penetesan. Sebagai grafik perbandingan temperatur tanpa penetesan droplet dan dengan penetesan droplet dapat dilihat pada gambar di bawah, waktu penetesan sama yaitu saat detik ke 60.



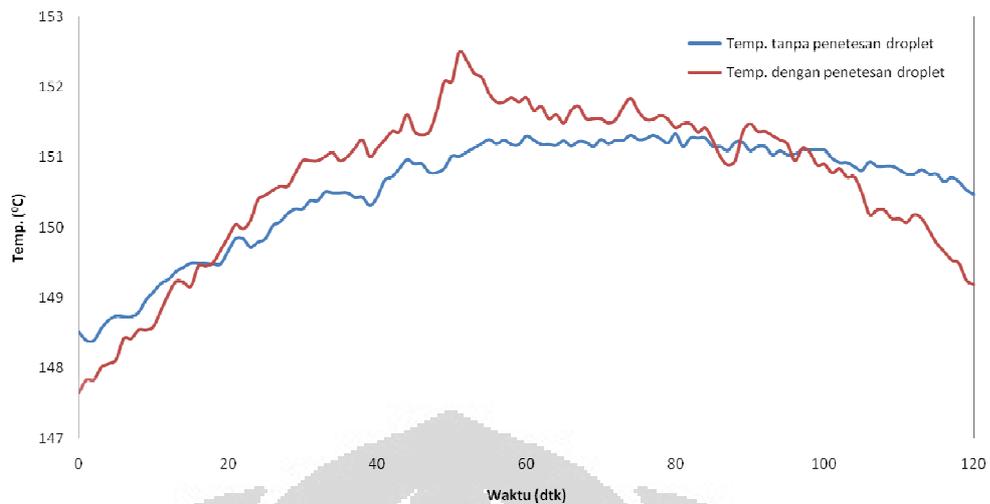
**Gambar 5.18** Grafik temperatur dan waktu dengan penetesan dan tanpa penetesan droplet pada temp. 210<sup>0</sup>C minyak kelapa



**Gambar 5.19** Grafik temperatur dan waktu dengan penetesan dan tanpa penetesan droplet pada temp. 190<sup>0</sup>C minyak kelapa

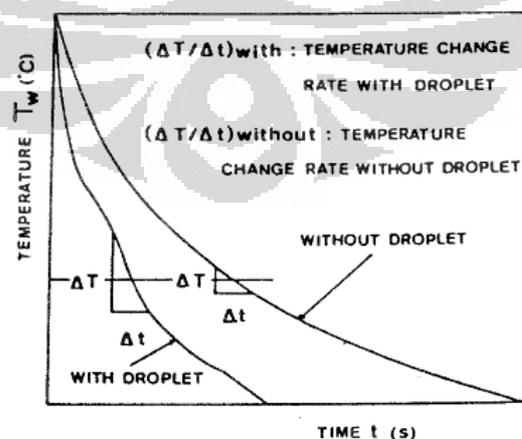


**Gambar 5.20** Grafik temperatur dan waktu dengan penetesan dan tanpa penetesan droplet pada temp. 170<sup>0</sup>C minyak kelapa



**Gambar 5.21** Grafik temperatur dan waktu dengan penetesan dan tanpa penetesan droplet pada temp. 150<sup>0</sup>C minyak kelapa

Dari grafik perbandingan antara karakteristik temperatur minyak goreng dengan penetesan dan tanpa penetesan droplet dapat disimpulkan bahwa temperatur dengan penetesan droplet akan cepat mengalami penurunan setelah droplet ditetaskan yaitu pada saat detik ke 60. Fenomena ini sama dengan fenomena penetesan droplet pada permukaan padat (tembaga panas) yang telah dilakukan oleh *Jiro Senda* dan *Koji Yamada* dalam paper nya yang berjudul “*The heat transfer characteristics of a small droplet impinging upon a hot surface*”. Grafik yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar berikut[26].

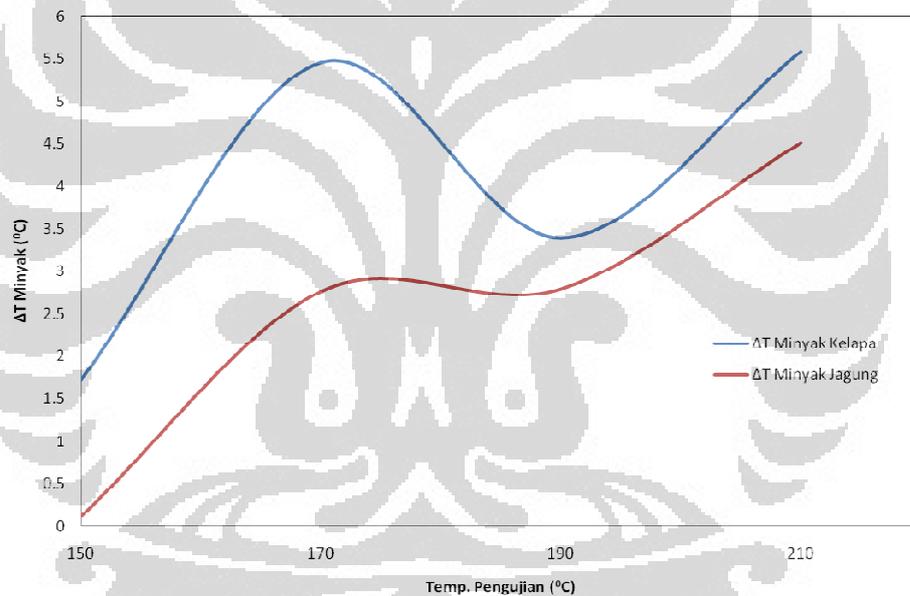


**Gambar 5.22** Karakteristik penurunan temperatur pada permukaan padat dengan penyemprotan dan tanpa penyemprotan droplet

Universitas Indonesia

Berdasarkan beberapa grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa saat sebuah cairan atau permukaan padat yang memiliki temperatur tinggi, jika disemprotkan atau diteteskan droplet (cairan dengan temperatur ruangan) maka akan mengalami penurunan temperatur yang lebih cepat dibandingkan tanpa penetasan droplet (pendinginan secara alami).

Jika dilihat perubahan temperaturnya setelah penetasan maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur minyak goreng nya maka perbedaan temperatur saat penetasan droplet dibandingkan sesaat setelah penetasan droplet akan lebih cepat turun nya atau  $\Delta T$  akan lebih besar. Pada gambar berikut merupakan  $\Delta T$  antara detik ke 110 dan detik ke 60 (saat penetasan droplet).



**Gambar 5.23** Perbedaan temperatur ( $\Delta T$ ) antara saat penetasan droplet dengan 50 detik setelahnya pada berbagai temperatur pengujian

# BAB VI

## KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Dalam pengujian penetesan droplet air dan penyemprotan kabut air mewakili dua metode pemadaman api yang digunakan yaitu menggunakan sistem pemadam api *sprinkler* dan sistem pemadam api kabut air. Kedua cara ini memiliki perbedaan dalam hal ukuran droplet, efektifitas pemadaman, karakteristik pemadaman hingga fenomena yang terjadi saat pemadaman. Dalam penelitian ini, telah dilakukan kedua cara tersebut yang menghasilkan dua fenomena yang berbeda. Secara umum dapat dituliskan sebagai berikut :

1. Faktor utama yang mempengaruhi intensitas cipratan dan letupan yang terjadi saat penetesan droplet atau penyemprotan kabut air pada minyak goreng dengan temperatur di bawah temperatur nyalanya adalah bilangan *Webber* dan temperatur minyak goreng itu. Besar kecilnya bilangan *Webber* dipengaruhi oleh diameter droplet serta ketinggian penetesannya. Temperatur minyak goreng akan mempengaruhi tegangan permukaan minyak goreng dan gaya *Bouyancy* nya.
2. Dari pengamatan hasil rekaman bahwa pada penetesan droplet air akan menghasilkan letupan yang lebih besar baik dari segi kekuatan maupun jumlahnya dibandingkan dengan penyemprotan kabut air.
3. Kedalaman kawah yang terjadi pada saat penetesan droplet juga tergantung dari nilai *Webber* dan temperatur nya. Untuk bilangan *Webber* yang sama maka semakin tinggi temperatur nya maka kedalaman kawah yang terbentuk akan semakin dangkal karena energi *dissipated* nya akan semakin besar. Akibatnya hanya diperlukan lebih sedikit energi untuk mengangkat cairan di dalam kawah untuk terjadi cipratan.
4. Fenomena letupan baik yang intensitas besar atau kecil lebih sering terjadi pada minyak jagung dibandingkan dengan minyak sawit atau minyak kelapa.

5. Letupan pada minyak goreng tidak harus terjadi dengan adanya interaksi antara zat padat dengan zat cair seperti yang telah disimpulkan pada penelitian lainnya, tapi pada penelitian ini membuktikan bahwa pada penyemprotan dengan kabut air, letupan atau ledakan dapat terjadi di tengah ketinggian minyak goreng (interaksi liquid dengan liquid).
6. Temperatur kritis untuk terjadi letupan pada minyak sawit adalah  $150^{\circ}\text{C}$ , dan ini merupakan yang terbesar diantara minyak goreng yang lainnya yaitu  $140^{\circ}\text{C}$ .
7. Saat terjadi letupan setelah penetesan droplet pada minyak goreng maka akan menyebabkan fluktuasi temperatur pada minyak goreng dimana temperatur cenderung untuk turun kemudian naik dengan nilai yang lebih tinggi. Setelah itu minyak goreng yang diteteskan droplet air akan memiliki trend penurunan temperatur yang lebih cepat dibandingkan dengan tanpa penetesan droplet.

## 6.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Merekam fenomena letupan yang terjadi setelah penetesan droplet atau penyemprotan kabut air pada minyak goreng pada temperatur nyalanya (*auto ignition*), dimana terdapat api di atas minyak goreng.
2. Melihat karakteristik atau gradien temperatur minyak goreng pada berbagai ketinggian saat pemanasan dari atas atau pun saat pemanasan dari bawah.
3. Mengukur besarnya letupan yang terjadi pada saat penetesan droplet air dengan menggunakan suatu alat seperti *pressure transducer*, sehingga dapat dihitung berapa energi yang dilepaskan saat terjadi letupan.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Ho, San Ping., “Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires”, Worcester Polytechnic Institute, August 2003.
- [2] NFPA 30, Flammable and Combustible Liquids Code, 1996 edition, National Fire Protection Association pada Ho, San Ping., “Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires”, Worcester Polytechnic Institute, August 2003.
- [3] FMGlobal Data Sheet 5-4 dan NFPA 325 pada Ho, San Ping., “Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires”, Worcester Polytechnic Institute, August 2003.
- [4] NFPA 325 pada Ho, San Ping., “Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires”, Worcester Polytechnic Institute, August 2003.
- [5] Procter and Gamble OL-700C Material Safety Data Sheet pada Ho, San Ping., “Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires”, Worcester Polytechnic Institute, August 2003.

- [6] Gulf Mineral Seal Oil Material Safety Data Sheet pada Ho, San Ping., "Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires", Worcester Polytechnic Institute, August 2003.
- [7] Mariance, "Efektifitas Kabut Air Untuk Pemadaman Kolam Api Berbahan Bakar Minyak Goreng", Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Program Studi Teknik Mesin, Desember 2009.
- [8] Samuel L. Manzello and Jiann C. Yang, "The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2002.
- [9] F. Rodriguez and R. J. Mesler, "Some drops don't splash," J. Colloid Interface Sci. 106, 347 (1985) pada Samuel L. Manzello and Jiann C. Yang, "The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2002.
- [10] M.Hsiao, S. Lichter, and L. G. Quintero, "The critical Weber Number for vortex and jet formation for drops impinging on a liquid pool," Phys. Fluids 31, 3560 (1988) pada Samuel L. Manzello and Jiann C. Yang, "The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2002.

- [11] D. S. Chapman and P. R. Critchlow, "Formation of vortex rings from falling drops," *J. Fluid Mech.* 29, 177 (1967) pada Samuel L. Manzello and Jiann C. Yang, "The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2002.
- [12] J. J. Thompson and H.F. Newell, "On the formation of vortex rings by drops falling into liquids and some applied phenomena," *Proc. R. Soc. London* 39, 417 (1885) pada Samuel L. Manzello and Jiann C. Yang, "The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2002.
- [13] M. J. Rein, "The transition regime between coalescing and splashing drops," *J. Fluid Mech.* 306, 145 (1996) pada Samuel L. Manzello and Jiann C. Yang, "The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing," Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, December 2002.
- [14] Worthington, A. M., *A Study of Splash*, September, 1907 pada Ho, San Ping., "Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires", Worcester Polytechnic Institute, August 2003.
- [15] Cossai, G.E., Coghe, A., Marengo, M., "The Impact of a Single Drop on a Wetted Solid Surface", *Experiments in Fluids*, Volume 22, pp 463-472, 1997 pada Ho, San Ping., "Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires", Worcester Polytechnic Institute, August 2003.

- [16] Bernadin, John D., Stebbins, Clinton J. and Mudawar, Issam, “Mapping of Impact and Heat Transfer Regimes of Water Drops Impinging on a Polished Surface”, *International Journal of Heat Mass Transfer.*, Volume 40, No.2, pp 247-267,1997.
- [17] Manzello, Samuel L. and Yang, Jiann C., “The Influence of Liquid Pool Temperature on the Critical Impact Weber Number for Splashing”, *Physics of Fluids*, Vol 15, Number 1, pp257-260, January 2003.
- [18] O. G. Engel, “Crater depth in fluid mechanics,” *J. Appl. Phys.* 37, 1798 (1966)
- [19] Manzello, Samuel L., Yang, Jiann C., Cleary, Thomas G., “On the Interaction of a Liquids Droplet With a Pool of Hot Cooking Oil”, *Fire Safety Journal* Vol. 38 pp651-659, 2003.
- [20] Cengel, Yunus A., Boles, Michael., (Fourth Edition) “*Thermodynamics an Engineering Approach*”, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [21] Wijayasinghe M S, Makey T B. Cooking oil: A home fire hazard in Alberta, Canada. *Fire Tech*, 1997, 33: 140—166
- [22] Voelkert C. The new class K. *NFPA J*, 1999, 7/8
- [23] Sumarsono, Danardono A., Mariance., Wahyu, I Gede., Nugroho, Yulianto S., “An Experimental Study of a Water Droplet Impinging Upon a Pool of Hot Cooking Oil”, *Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Bali, February 2010.

- [24] Flingoh, C H OH., Chiew Let, Chong., “Surface Tension of Palm Oil, Palm Olein and Palm Stearin”, *Elaeis* 4(1) June 1992
- [25] Incropera, Frank P., DeWitt, David P., (Fourth Edition) “Fundamental of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, New York.
- [26] Senda, Jiro., Yamada, Koji., “The Heat Transfer Characteristics of a Small Droplet Impinging Upon a Hot Surface”, *JSME International Journal, Series II, Vol. 31, No. 1, 1988.*
- [27] Kim, Erica., “Drop Impact on Various Surfaces”, Applied Mathematics Lab, New York University, September 21, 2005.
- [28] Sartika, Ratu Ayu Dewi., “Pengaruh Suhu dan Lama Proses Menggoreng (Deep Frying) Terhadap Pembentukan Asam Lemak Trans”, Departemen Gizi Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia, Depok 16424, *Makara Sains*, Vol. 13, No. 1, April 2009 : 23-28.
- [29] Zhigang Liu and Andrew K. Kim, A Review Of The Research and Application of Water Mist Fire Suppression Systems – Fundamental Studies, *Journal of Fire Protection Engineering*, v. 10, no. 3, 2000, pp. 32-50.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

Tabel perubahan volume droplet saat terjadi ledakan pada minyak jagung dengan ketinggian penetasan droplet 20 cm temperatur minyak goreng 220<sup>0</sup>C.

Waktu (ms)	Diameter droplet terukur (mm)	Diameter gelas terukur (mm)	Diameter gelas sesungguhnya (mm)	Diameter droplet sesungguhnya (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Perubahan volume droplet (mm <sup>3</sup> )	Detik sesungguhnya
0	2	63.5	45	1.42	1.49	0.00	2912 ms
1	4.5	63.5	45	3.19	16.97	15.48	2913 ms
2	7.5	63.5	45	5.31	78.57	61.60	2914 ms
3	8	63.5	45	5.67	95.36	16.79	2915 ms
4	8.5	63.5	45	6.02	114.38	19.02	2916 ms
5	19	63.5	45	13.46	1,277.48	1,163.10	2917 ms
6	23	63.5	45	16.30	2,266.10	988.61	2918 ms
7	22	63.5	45	15.59	1,983.18	-282.91	2919 ms
8	23	63.5	45	16.30	2,266.10	282.91	2920 ms

