

SKRIPSI

**DETERMINASI SIFAT OPTIK DAN KIMIA SENYAWA KLOROFIL
EKSTRAK DAUN JARAK (*Jatropha curcas* L.) DAN DAUN PEPAYA
(*Carica papaya* L.) SEBAGAI AGEN ANTIMIKROBA DAN
FOTOSENSITIZER DALAM FOTOINAKTIVASI MIKROBA**

Disusun dan diajukan oleh

SYAHRUL RAMADHANA

H021 17 1003



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2022

**DETERMINASI SIFAT OPTIK DAN KIMIA SENYAWA KLOROFIL
EKSTRAK DAUN JARAK (*Jatropha curcas* L.) DAN DAUN PEPAYA
(*Carica papaya* L.) SEBAGAI AGEN ANTIMIKROBA DAN
FOTOSENSITIZER DALAM FOTOINAKTIVASI MIKROBA**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada Program Studi Fisika Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

SYAHRUL RAMADHANA

H021 17 1003

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**DETERMINASI SIFAT OPTIK DAN KIMIA SENYAWA KLOROFIL
EKSTRAK DAUN JARAK (*Jatropha curcas L.*) DAN DAUN PEPAYA
(*Carica papaya L.*) SEBAGAI AGEN ANTIMIKROBA DAN
FOTOSENSITIZER DALAM FOTOINAKTIVASI MIKROBA**

Disusun dan diajukan oleh:

SYAHRUL RAMADHANA

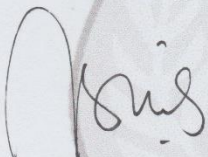
H021 17 1003

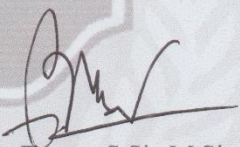
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Fisika Fakultas Matematika
dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
pada tanggal 23 Februari 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

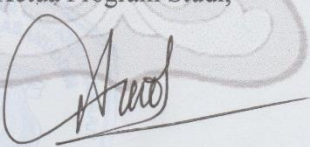
Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Dr. Sri Dewi Astuty Ilyas, S.Si, M.Si
NIP. 19750513 199903 2 001


Bannu, S.Si., M.Si
NIP. 19730521 199802 1 002

Ketua Program Studi,


Prof. Dr. Arifin, M.T.
NIP. 19670520 199403 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Syahrul Ramadhana
NIM : H021 17 1003
Program Studi : Fisika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**Determinasi Sifat Optik dan Kimia Senyawa Klorofil Ekstrak Daun Jarak
(*Jatropha curcas L.*) dan Daun Pepaya (*Carica papaya L.*) Sebagai Agen
Antimikroba dan Fotosensitizer Dalam Fotoaktivasi Mikroba**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain, bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau seluruh skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 23 Februari 2022

Yang Menyatakan,



Syahrul Ramadhana

ABSTRAK

Photodynamic Inactivation (PDI) merupakan prosedur terapi untuk pengobatan penyakit yang disebabkan oleh mikroba. Mekanisme kerja PDI membutuhkan molekul oksigen, agen fotosensitizer dan cahaya yang bersinergi menghasilkan aktivitas penghambatan pertumbuhan sel yang tidak normal. Mekanisme inaktivasi fotokimia berdasarkan interaksi antara foton cahaya dengan molekul sensitizer menghasilkan beberapa jenis senyawa *Reactive Oxygen Singlet* (ROS). Pada penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik sifat kimia dan sifat optik klorofil ekstrak Daun Jarak (*Jatropha curcas* L.) dan ekstrak Daun Pepaya (*Carica papaya* L.) dan hasil perlakuan fotoinaktivasi terhadap biofilm *S. Epidermidis* dengan variasi energi penyinaran berdasarkan indikator nilai *Optical Density* (OD) serta kadar *Malondialdehyde* (MDA) sebagai indikator produksi senyawa ROS selama fotoinaktivasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa untuk karakteristik kimia daun jarak dan daun pepaya memiliki 3 unsur dominan yaitu Ca, K dan Si. Sedangkan untuk karakteristik optiknya untuk daun jarak pada optimum menyerap cahaya pada $\lambda_1= 427$ nm, $\lambda_2= 539$ nm, $\lambda_3= 613$ nm, dan $\lambda_4= 669$ nm, puncak serapan daun pepaya pada $\lambda_1= 415$ nm, $\lambda_2= 535$ nm, $\lambda_3= 611$ nm dan $\lambda_4= 669$ nm. Berdasarkan uji MDA, pengaplikasian ekstrak daun jarak (*Jatropha Curcas* L.) dengan nilai MDA sebesar 0,392 nmol/mL untuk kelompok PL5. Hasil uji XTT dengan variabel nilai *Optical Density* (OD) untuk pengaplikasian ekstrak yang sama diperoleh penghambatan sebesar 67,39%.

Kata Kunci: *photodynamic inactivation* (PDI); daun jarak (*Jatropha curcas* L.); daun pepaya (*Carica papaya* L.).

ABSTRACT

Photodynamic Inactivation (PDI) is a therapeutic procedure for the treatment of diseases caused by microbes. The mechanism of action of PDI requires molecular oxygen, photosensitizer agents, and synergistic light to produce abnormal cell growth inhibitory activity. The photochemical inactivation mechanism based on the interaction between light photons and sensitizer molecules produces several types of *Reactive Oxygen Singlet* (ROS) compounds. This study aims to identify the characteristics of the chemical and optical properties of chlorophyll extract of Jatropha Leaf (*Jatropha curcas* L.) and Papaya Leaf Extract (*Carica papaya* L.) and the results of photoinactivation of *S. Epidermidis* biofilm with variations in irradiation energy based on the Optical Density (OD) value indicator. OD and levels of *Malondialdehyde* (MDA) as an indicator of the production of ROS compounds during photoinactivation. The results obtained indicate that the chemical characteristics of castor leaves and papaya leaves have 3 dominant elements, namely Ca, K and Si. Meanwhile, for the optical characteristics, the optimum light absorption for jatropha leaves is at $\lambda_1 = 427$ nm, $\lambda_2 = 539$ nm, $\lambda_3 = 613$ nm, and $\lambda_4 = 669$ nm, the absorption peak of papaya leaves at $\lambda_1 = 415$ nm, $\lambda_2 = 535$ nm, $\lambda_3 = 611$ nm, and $\lambda_4 = 669$ nm. Based on the MDA test, the application of jatropha leaf extract (*Jatropha Curcas* L.) with an MDA value of 0.392 nmol/mL for the PL5 group. The results of the XTT test with the Optical Density (OD) value variable for the application of the same extract obtained an inhibition of 67.39%.

Keywords: photodynamic inactivation (PDI); jatropha leaf (*Jatropha curcas* L.); papaya leaf (*Carica papaya* L.).

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah Yang Maha Pemberi Petunjuk lagi Maha Pemberi Manfaat, Yang Maha Mengetahui lagi Maha Luas Karunia-Nya. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada baginda kita, Muhammad Shallallahu Alaihi Wa Sallam, perkataan, perilaku dan diamnya menjadi patokan berperilaku dan beribadah umat islam setelah kitab suci Al-Qur'an.

Alhamdulillah, setelah melalui berbagai rintangan dan tantangan penulis akhirnya mampu menyelesaikan skripsi ini yang penulis sadari masih belum sempurna dan masih sangat banyak kekurangan di dalamnya. Akan tetapi penulis memiliki harapan besar semoga skripsi ini bisa menjadi pelajaran bagi penulis pribadi maupun yang membacanya, sekaligus memberikan manfaat dari segi substansi yang tertuang di dalamnya.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua terkasih, bapak tersayang, H. Hasan dan ibu tercinta, Hj. Hadiana yang selalu memberikan curahan kasih sayang, doa, perhatian, cinta, dan dukungan, baik secara moral maupun secara materi. Terima kasih atas segala pertanyaan “Bagaimana datamu? Sampe manami? Kapan ujian? Kapan wisuda?”. Maaf telat lulus, terima kasih telah sabar menunggu. I've tried my best. Thanks for being a great parents and teaching me a lot.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada kakak-kakak Hasriani dan Ahmad Ramadhana yang selalu memberikan nasihat, motivasi dan semangat kepada penulis. Semoga Allah senantiasa membalas semua kebaikan yang telah diberikan. Penulis juga meminta maaf atas segala kekhawatiran yang muncul karena seringnya penulis pulang malam dari sejak maba sampai semester akhir ini.

Selain itu, dengan segala kerendahan hati, penulis juga ingin menyampaikan ucapan banyak terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Rektor Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.
2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.

3. Ketua Departemen Fisika, **Prof. Dr. Arifin, M.T**, serta **Bapak dan Ibu Dosen Pengajar Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin**. Terima kasih atas ilmu dan bimbingannya selama ini. Semoga hasil ajaran Bapak/Ibu selalu memberikan manfaat bagi setiap orang.
4. Ibu **Dr. Sri Dewi Astuti Ilyas., M.Si**. selaku dosen pembimbing utama selama penulis berproses di bangku perkuliahan. Terima kasih banyak atas ilmu dan waktunya untuk membimbing, memotivasi, dan memberikan arahan dalam menyelesaikan skripsi. Terima kasih juga atas kesabaran dalam menghadapi saya, ibu. Maafkan atas segala bentuk kekalasian saya selama proses penyusunan skripsi.
5. Bapak **Bannu, S.Si, M.Si** selaku dosen pembimbing pertama sekaligus yang selalu memberi masukan dan saran kepada penulis. Terima kasih banyak.
6. **Prof. Dr. Syamsir Dewang., M.Sc** dan **Dr. Nurlaela Rauf, M.Sc** selaku dosen penguji. Terima kasih atas waktu yang diluangkan serta kritik dan saran yang membangun dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Bapak/Ibu **Staf Pegawai FMIPA Unhas**, terutama **Staf Departemen Fisika; Pak Syukur, Pak Ahmad, Ibu Evi** dan **Kak Rana** yang selalu membantu proses administrasi di departemen. Terima kasih cemilan dan gosip-gosip singkatnya, kak. Maafkan saya yang selalu bikin ricuh di departemen.
8. **TAMPAN MAKS**. Zahari, Aat, Faqih, Puat, Gabe, Angga, Tsaqifa, Batra, Madan/saleh, Ale, Dandung, Khalisa, Zain, Fadlan, Riyadi, Aldo, Albar, Agung, Rial, Uus, Qoil, Fajar, Indra, Ebiet, Sabran/lambert, Ucha, Reza, Mano, Jefri, Faishal, Wahyu, Bintang. Terima kasih atas segala suka, duka, tawa, cerita dan calla-callanya.
9. Keluarga **Lab. Biofisika dan Fisika Medik 2017**, Atex, Egy, Sapriani, Kiki, Owel, Zain Ediman, Flavenia, Wahyudin dan Madan. Terima kasih telah menemani dan membawa keceriaan di tengah-tengah tuntutan

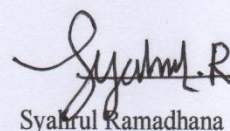
penyelesaian skripsi. Terima kasih atas kisah 5 semester terakhirnya. Saya sangat bersyukur memilih Optik kala itu.

10. Saudara tak sedarah, **Himafi 17**: Zahari, Aat, Faqih, Puat, Gabe, Angga Laso, Nobita, Batra, Madan, Bang Ale, Dandung, Khalis, Zain, Detol, Riyadi, Aldo, Albar, Agung, Rial, Uus, Qoil, Fajar, Indra, Ebiet, Sabran (lambertus), Ucha, Reza, Mano, Jefri, Faishal, Wahyu, Bintang, Rahma, Asni, Ate, Ola, Owel, Uci, Zahra, Cindy, Syakirah, Khusnul, Adhe, Hikmah, Mirna, Cande, Ningnung, Gita, Rapang, Agatha, Suci, Titien, Ghufa, Senja, Fitria, Rachel, Mayama, Ainun, Cammai, Esi, Nova, Destri, Kiki, Ajeng, Egi, Desha, Wide, Illa, Miftah, Sappe, Evita, Sindy, Unia, Riri, Gebrin, Danti, Daya, Melsi, dan Aulia Puji. Terima kasih atas segala cerita, suka-dukanya, kebersamaannya, callaannya, kemaddiksannya, momentmoment serunya, dan untuk semua kenangan yang pernah kita ukir bersama. **Salam Teguh dalam Keyakinan, Kukuh dalam Kebersamaan.**
11. Kakak-kakak pengurus Himafi 2015, Kak Hafis, Kak Yadin, Kak Jr, Kak Ika, Kak Amming, kak Ammi' dan kakak-kakak yang belum sempat disebut namanya. Terima kasih telah memberikan arahan dan masukan selama saya menjadi mahasiswa, baik akademik maupun non-akademik.
12. **Keluarga Besar Himafi FMIPA Unhas.** Terima kasih telah membentuk keras, kuat, cerdas dan berani di dalam diri saya, serta memperkenalkan dan mengajarkan banyak hal baru sejak saya menjadi mahasiswa baru hingga saat ini.
13. Adik-adik **Himafi 2018.** Dede, Azlan, Sandro, Sorong, Sabran, Liuz, Dena, Micin, Iis, Bonca, Gopal, Tara, tengke, Vika, Irma, Tater, dan semua adinda yang tidak sempat disebutkan namanya.
14. Adik-adik **Himafi & HMGF 2019.** Steven, Batlas, Jimbo, Arsyi, Yusri, Mawang, Alif, Haikal, Fausta, Ashar, Haidir, Mas Agus, Israil, Hajrul, Gunawan, Momsky, Nurul, Asira, Tiche, Nabila, Kopat, Roslela, Wahyuni, Ita, Mey, Cindy, Devi, Ismet, Fattio, Nude, Jinan, Sarni dan semua adinda yang tidak sempat disebutkan namanya.

15. **Himafi & HMGF 2020.** Sinte', Jamet, Enjel, Kimberly, Asma, Letnan, Isma, Harmi, Nindi, Astri, Resty, Selfi, Fadia dan adik-adik yang tidak sempat disebut namanya.
16. **Keluarga Besar KPA OMEGA FMIPA UNHAS.** Terima kasih atas pelajaran dan pengalaman yang luar biasa selama menjalankan roda organisasi.
17. Teman-teman **DIKSAR XXIII KPA OMEGA FMIPA UNHAS.** Kak Boy, Kak Yadin, Kak Aso, Kak Agung, Kak Oland, Kak Uni, Kak Lili, Kak Kasma, Kak Hasrina, Fadlan, Nobita, Gabe, Ola, Owel, Cammai dan Rachel
18. **Kak Suri Jasmip.** Terima kasih sudah menjadi kakak sekaligus ibu selama di kampus. Terima kasih cerita, lawakan, callaan, dan asupan gizinya
19. Last and very important, terima kasih kepada Callu, yang tetap waras dan bertahan untuk sampe di titik ini. Thank you for being thing strong and resilient. Terima kasih untuk semua sabar dan syukurnya, terima kasih sudah bersedia belajar dan bertumbuh. I hope you're getting stronger, wiser, and more resilient. You've learned a lot. It's okay to not be perfect. Keep going till the end. Yaa, dan selamat atas gelarnya!

Terakhir, dengan segala hormat dan kerendahan hati, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan mengharap kritik dan saran yang membangun. Apabila terdapat kesalahan dan kekeliruan dalam skripsi ini, maka sepenuhnya berasal dari penulis.

Makassar, 23 Februari 2022


Syahrul Ramadhana

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 <i>Photodynamic Therapy</i> (PDT)	5
II.2 Mekanisme Fotodinamik Inaktivasi (PDI)	8
II.3 Laser dalam Fotodinamik Terapi.....	9
II.4 Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha curcas L.</i>) dan Daun Pepaya (<i>Carica papaya L.</i>) sebagai Agen Antimikroba Dan Fotosensitizer.....	10
II.5 Biofilm <i>Staphylococcus epidermidis</i>	12
II.6 <i>Malondialdehyde</i> (MDA)	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Waktu dan Tempat	15
III.2 Alat dan Bahan.....	15
III.3 Prosedur Kerja.....	15
III.4 Bagan Alir Penelitian	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	

1V.1 Ekstraksi Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha curcas</i> L.) dan daun Pepaya (<i>Carica papaya</i> L.)	21
IV.2 Karakterisasi Sifat Optik dan Kimia Ekstrak Daun Jarak (<i>Jatropha curcas</i> L.) dan Daun Pepaya (<i>Carica papaya</i> L.).....	22
IV.3 Hasil Uji Toksitas	24
IV.4 Hasil Uji XTT <i>assay</i>	26
IV.5 Hasil Uji MDA.....	33
BAB V PENUTUP	
V.1 Kesimpulan	36
V.2 Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	38
LAMPIRAN	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Fotodinamik Inaktivasi	9
Gambar 2.2 Laser Biru	10
Gambar 2.3 Daun jarak pagar (<i>Jatropha curcas</i> L.) dan Daun pepaya (<i>Carica papaya</i> L.)	11
Gambar 2.4 Gambar SEM Biofilm <i>S. epidermidis</i>	13
Gambar 2.5 Skema pembentukan senyawa MDA	13
Gambar 2.6 Skema Kaitan antara PDI-ROS-MDA	14
Gambar 3.1 Bagan Alir	20
Gambar 4.1 Hasil Uji KLT	21
Gambar 4.2a Spektrum Absorbansi Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas</i> L.)	22
Gambar 4.2b Spektrum Absorbansi Klorofil Daun Pepaya (<i>Carica Papaya</i> L.)	22
Gambar 4.3a Zona Bening untuk Antibiotik	24
Gambar 4.3b Zona Bening untuk MIC	25
Gambar 4.4 Grafik perlakuan nilai <i>Optical Density</i> hasil perlakuan fotoinaktivasi pada sampel Biofilm <i>Staphylococcus epidermidis</i> dan Ekstrak Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas</i> L.) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen	27
Gambar 4.5 Grafik perlakuan nilai <i>Optical Density</i> hasil perlakuan fotoinaktivasi pada sampel Biofilm <i>Staphylococcus epidermidis</i> dan Ekstrak Daun Pepaya (<i>Carica Papaya</i> L.) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen	29
Gambar 4.6 Grafik efek penghambatan Biofilm Ekstrak Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas</i> L.) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen.	30
Gambar 4.7 Grafik efek penghambatan Biofilm Ekstrak Daun Pepaya (<i>Carica Papaya</i> L.) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen.....	31
Gambar 4.8 Grafik Nilai MDA pada Laser Biru PACT dengan Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas</i> L.) ke Biofilm <i>S. Epidermidis</i>	34

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipe reaksi dan kinetika fotosensitizer setelah penyerapan energi foton cahaya.....	7
Tabel 4.1 Unsur dan Persentase Kandungan pada Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas L.</i>) dan Klorofil Daun Pepaya (<i>Carica Papaya L.</i>).....	21
Tabel 4.2 Diameter Zona Bening Untuk Mengetahui Antibiotik.....	25
Tabel 4.3 Diameter Zona Bening Untuk Nilai MIC.....	26
Tabel 4.4 Data Nilai OD dari Biofilm Ekstrak Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas L.</i>) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen.	27
Tabel 4.5 Data Nilai OD dari Biofilm Ekstrak Daun Pepaya (<i>Carica Papaya L.</i>) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen.....	28
Tabel 4.6 Hasil Uji XTT klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas L.</i>) dan klorofil Daun Pepaya (<i>Carica Papaya L.</i>)	32
Tabel 4.7 Data Perhitungan MDA dari Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas L.</i>) dengan perlakuan tanpa penambahan oksigen.....	33
Tabel 4.8 Data Perhitungan MDA dari Klorofil Daun Jarak (<i>Jatropha Curcas L.</i>) dengan perlakuan penambahan oksigen.....	33

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Mekanisme *photodynamic therapy* (PDT) atau fotodinamik terapi banyak digunakan dalam bidang terapi, salah satunya diarahkan untuk menghambat pertumbuhan sel patogen dari mikroorganisme yang menyerang tubuh dengan istilah fotoinaktivasi atau *photodynamic inactivation* (PDI) [1].

Fotodinamik memanfaatkan proses alami suatu molekul mendapatkan sejumlah energi cahaya. Proses ini melibatkan tiga tahap yang berkelanjutan yaitu proses fotofisika, fotokimia dan fotobiologi yang digambarkan melalui suatu diagram Jablonski. Mekanisme fotodinamika melibatkan komponen sumber cahaya dan material pendukung yang mampu menyerap cahaya disebut *Photosensitizer* (PS) atau fotosensitizer. Berkas cahaya yang mengandung sejumlah energi foton diserap oleh molekul PS, sehingga teraktivasi dan mengalami eksitasi secara spontan ke tingkat singlet hingga triplet sebelum kembali ke keadaan awal (tingkat dasar) setelah melepaskan kelebihan energinya dalam bentuk pelepasan energi ke lingkungan atau pelepasan sebagian elektronnya ke molekul lainnya yang terdekat [2].

Mekanisme ini selanjutnya memberikan peluang terjadinya reaksi kimia melalui proses fotokimia menghasilkan senyawa radikal atau *Reactive Oxygen Species* (ROS) selama berlangsungnya penyinaran. Senyawa (ROS) tersebut sangat reaktif dan beracun sehingga mampu mematikan sel-sel yang berkembang tidak normal atau sel yang mengalami pertumbuhan yang sangat cepat seperti mikroorganisme dan sel-sel kanker [3]. Berdasarkan struktur molekul kimianya, senyawa radikal memiliki elektron bebas pada kulit terluarnya sehingga sangat reaktif dan radikal, cukup banyak jenisnya tapi yang keberadaannya paling banyak dalam sistem biologis tubuh adalah radikal bebas turunan oksigen atau *reactive oxygen species* (ROS). Senyawa ROS dapat dihasilkan dari proses metabolisme sel normal di dalam tubuh (ROS Endogen) dan dapat dihasilkan dari paparan zat-zat lain atau radikal-radikal dari luar tubuh (ROS eksogen) yang dapat

menyebabkan terjadinya inflamasi atau peradangan. Senyawa ROS yang paling banyak terbentuk adalah superoksida yang dapat berubah menjadi hidrogen peroksida (H_2O_2) kemudian menjadi radikal hidroksil ($*OH$). Radikal hidroksil inilah yang menyebabkan terjadinya peroksidasi lemak pada membran sel sehingga sel mengalami kerusakan. Prinsip ini berlaku pada aktivitas cahaya yang mengaktivasi molekul PS dan direspon oleh mikroorganisme patogen yang menyerang tubuh serta menjadi mekanisme utama dalam prinsip PDT.

Salah satu agen fotosensitizer yang dikembangkan saat ini adalah senyawa klorofil yang banyak terdapat pada tanaman dengan potensi tambahan yaitu keberadaan zat aktif antimikroba seperti *flavonoid*, *saponin*, dan *tannin*. Fotosensitizer klorofil termasuk pada perkembangan agen fotosensitizer generasi ketiga yang berisifat alami, sifat kimiawi murni, potensi penghasil senyawa ROS dengan *quantum yield* tinggi, mudah diekstrak dan mudah dikemas. [4]. Salah satu tanaman yang diekstrak adalah daun jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dan daun pepaya (*Carica papaya* L.) dan telah lama digunakan dalam pengobatan tradisional. Minyak pada tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dapat digunakan sebagai pembersih perut (pencahar), mengobati penyakit kulit dan rematik, obat batuk dan antiseptik pasca melahirkan, menyembuhkan peradangan luka [5]. Daun pepaya bermanfaat sebagai anti kanker, menghambat pertumbuhan bakteri/jamur, meningkatkan sifat imun tubuh, anti pencegah demam berdarah, mengobati jerawat, mengobati nyeri haid dan membantu pencernaan [2]. Tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dan tanaman Pepaya (*Carica papaya* L.) mengandung *flavonoid*, *saponin*, dan *tannin*, terutama pada getahnya yang memiliki manfaat untuk mengobati infeksi pada *gingiva* (gusi) dan juga mampu membekukan darah dengan baik [6].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Jing Shen dkk pada tahun 2019, mengenai efek antimikroba dari *Toluidine Blue O* (TBO) dengan *Photodynamic Antimicrobial Chemotherapy* (PACT) pada *Staphylococcus epidermidis* dan *Staphylococcus aureus* menggunakan energi penyinaran sebesar $5,27 \text{ mW/cm}^2$ dan durasi penyinaran 30 menit. Masing-masing diperoleh reduksi pertumbuhan sel bakteri untuk *Staphylococcus epidermidis* sebesar 1.49×10^7 CFU/mL

sedangkan untuk bakteri *Staphylococcus aureus* sebesar 1.5×10^7 CFU/mL [7]. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Hasan Kariminezhad dkk tahun 2019, mengenai potensi nanopartikel emas *PEGylated* yang dikomposit dengan metilen biru pada fotodinamik inaktivasi *Staphylococcus epidermidis* menggunakan laser merah (630 nm dan 100 mW/cm^2) melaporkan bahwa dibandingkan dengan kelompok kontrol, setelah penyinaran laser selama 20 menit terjadi penurunan viabilitas bakteri sebesar 10,3%, selanjutnya dengan *PEGylated* (10 g/ml) selama peningkatan durasi paparan menyebabkan penurunan viabilitas signifikan hingga 15,5%. Pada komposit *MB/PEGylated*, setelah paparan 5, 20 dan 60 menit, reduksi viabilitas sel berturut-turut sebesar 19%, 27,4%, dan 32,3%. [8].

Berdasarkan penjelasan sebelumnya maka akan dilakukan penelitian determinasi sifat optik dan sifat kimia menggunakan senyawa klorofil ekstrak daun jarak dan daun pepaya sebagai agen antimikroba dan fotosensitizer dalam fotoinaktivasi mikroba dengan uji karakterisasi menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dan Spektrofotometer *X-ray fluorescence* (XRF). Kajian tambahan pendukung adalah uji toksisitas ekstrak terhadap biofilm *Staphylococcus epidermidis* sebagai fungsi antimikroba serta uji XTT assay hasil perlakuan PDI sebagai fungsi fotosensitizer.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik sifat kimia dan sifat optik klorofil ekstrak Daun Jarak (*Jatropha curcas* L.) dan ekstrak Daun Pepaya (*Carica papaya* L.)?
2. Bagaimana pengaruh sifat optik ekstrak klorofil Daun Jarak (*Jatropha curcas* L.) dan Daun Pepaya (*Carica papaya* L.) terhadap mekanisme kematian sel *Staphylococcus epidermidis* berdasarkan nilai *Optical Density* (OD) dan *Malondialdehyde* (MDA)?

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang akan diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi karakteristik sifat kimia dan sifat optik klorofil ekstrak Daun Jarak (*Jatropha curcas* L.) dan ekstrak Daun Pepaya (*Carica papaya* L.).
2. Menganalisis hasil perlakuan fotoinaktivasi terhadap biofilm *S. Epidermidis* dengan variasi energi penyinaran berdasarkan indikator nilai *Optical Density* (OD).
3. Menganalisis pengaruh energi penyinaran terhadap kadar *Malondialdehyde* (MDA) sebagai indikator produksi senyawa ROS selama fotoinaktivasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 *Photodynamic Therapy (PDT)*

Photodynamic Therapy (PDT) merupakan prosedur terapi untuk pengobatan penyakit yang disebabkan oleh mikroba, mekanisme kerja PDT membutuhkan oksigen, senyawa fotosensitizer dan laser (cahaya) secara bersamaan [9]. Terapi PDT telah dipelajari untuk membunuh sel kanker (sel ganas), dengan kemajuan telah dibuat dan terbukti efektif melawan penyakit menular yang disebabkan oleh mikroorganisme patogen dan jenis fotoinaktivasi yang populer digunakan disebut *photodynamic inactivation (PDI)* [17]. Terapi PDI yang membutuhkan energi foton tertentu yang dapat bereaksi terhadap molekul fotosensitizer melalui proses fotokimia [18]. Fotoinaktivasi bertujuan untuk menghambat pertumbuhan mikroba patogen. Mekanisme inaktivasi fotokimia berdasarkan interaksi antara foton cahaya dengan molekul sensitizer menghasilkan beberapa jenis ROS (*Reactive Oxygen Singlet*). ROS merupakan senyawa reaktif yang dihasilkan dari reaksi senyawa radikal substrat triplet sensitizer terhadap molekul oksigen, sedangkan singlet molekul oksigen terbentuk dari reaksi triplet sensitizer menjadi molekul oksigen. Kedua jenis senyawa reaktif berkontribusi terhadap oksidasi biomolekul oleh mekanisme sel hidrolisis [19].

Radikal bebas adalah molekul, atom, atau gugus yang memiliki 1 atau lebih elektron tidak berpasangan di kulit terluarnya, membuatnya sangat reaktif, dan radikal seperti radikal bebas turunan oksigen reaktif (spesies oksigen reaktif). Ada banyak jenis radikal bebas, tetapi yang paling melimpah dalam sistem biologis tubuh adalah *Reactive Oxygen Species (ROS)* dan *Reactive Nitrogen Species (RNS)* [27].

Radikal bebas ini adalah hasil dari pembelahan homogen dari ikatan kovalen suatu molekul atau dari sepasang elektron tunggal suatu atom. spesies oksigen reaktif terutama merupakan hasil metabolisme sel normal dalam tubuh (ROS) endogen dan sebagian kecil karena paparan zat lain atau radikal dari luar tubuh (ROS eksogen) dapat menyebabkan peradangan atau pembengkakan. ROS

endogen merupakan respon fisiologis metabolisme sel normal, seperti metabolisme karbohidrat dan protein. Paparan dari luar tubuh adalah oksigen reaktif dari polutan lingkungan, radiasi, infeksi bakteri, jamur dan virus [27].

Ketika sinar cahaya mengenai media seperti jaringan biomolekuler, cahaya biasanya diserap, dipantulkan, dibiaskan atau dihamburkan. Pemantulan terjadi pada permukaan antara dua penyangga sedangkan pembiasan cahaya melalui penyangga bervariasi sesuai dengan kerapatan optik kisi. Proses pembiasan dan pemantulan cahaya mengikuti Hukum Snell dan Hukum Fresnel, yang dapat diminimalkan dengan menerapkan cahaya tegak lurus terhadap target, sedangkan hamburan cahaya pada jaringan target mempengaruhi intensitas cahaya dan arah penyinaran pada target. Penyerapan foton cahaya merupakan interaksi yang paling dominan dalam fotoaktivitas menurut hukum Lambert-Beer [24].

Dalam konsep molekuler dan seluler, komponen yang mampu menyerap cahaya disebut kromofor. Sel pigmen utama dalam jaringan adalah air, melanin dan oksihemoglobin (HbO_2). Penyerapan cahaya oleh oksihemoglobin terjadi pada beberapa panjang gelombang, yaitu 280, 420, 540 dan 580 nm; Sementara itu, penyerapan melanin menurun dengan meningkatnya panjang gelombang [25]

Kebanyakan fotosensitizer termasuk dalam kelompok pewarna organik. Keadaan elektronnya dicirikan oleh keadaan singlet (momen spin elektron total $s = 0$) dan keadaan triplet ($s = 1$). Selanjutnya, setiap keadaan elektronik adalah dibagi menjadi pita keadaan vibrasi. Penyeberangan antarsistem diizinkan tetapi dikaitkan dengan peningkatan masa pakai. Kinetika reaksi potensial dari fotosensitizer tercantum pada Tabel 2.1. Jenis reaksi dapat dicirikan oleh eksitasi, peluruhan, Tipe I atau reaksi Tipe II, dan perlindungan karotenoid [25].

Tabel 2.1. Tipe reaksi dan kinetika fotosensitizer setelah penyerapan energi foton cahaya

Eksitasi <ul style="list-style-type: none"> • Penyerapan keadaan singlet 	$^1S + hv \Rightarrow ^1S^*$
Peluruhan <ul style="list-style-type: none"> • Peluruhan singlet radiasi • Peluruhan singlet nonradiatif • Intersistem Crossing • Peluruhan triplet radiasi • Peluruhan triplet nonradiatif 	$^1S^* \Rightarrow ^1S + hv'$ (fluoresensi) $^1S^* \Rightarrow ^1S$ $^1S^* \Rightarrow ^3S^*$ $^3S^* \Rightarrow ^1S + hv''$ (pendar) $^3S^* \Rightarrow ^1S$
Reaksi kimia tipe I <ul style="list-style-type: none"> • Transfer hidrogen • Transfer elektron • Pembentukan hidrogen dioksida • Pembentukan anion superoksida 	$^3S^* + RH \Rightarrow SH^* + R^*$ $^3S^* + RH \Rightarrow S^* + RH^{*+}$ $SH^* + ^3O_2 \Rightarrow ^1S + HO^*_2$ $S^{*-} + ^3O_2 \Rightarrow ^1S + O^{*-}_2$
Reaksi kimia tipe II <ul style="list-style-type: none"> • Pertukaran intramolekul • Oksidasi seluler 	$^3S^* + ^3O_2 \Rightarrow ^1S + ^1O^*_2$ $^1O^*_2 + sel \Rightarrow sel\ sapi$
Kinetika karotenoid <ul style="list-style-type: none"> • Kepunahan oksigen tunggal • Penonaktifan 	$^1O^*_2 + ^1CAR \Rightarrow ^3O_2 + ^3CAR^*$ $^3CAR^* \Rightarrow ^1CAR + panas$

Aktivasi molekul fotosensitizer akibat respon terhadap energi foton cahaya menyebabkan terjadinya kelebihan energi yang secara spontan akan memindahkan posisi electron dasar molekul PS berpindah. Penyerapan energi foton cahaya dalam sistem atomik, menyebabkan atom molekul OS memiliki penambahan jumlah elektron dan energi kinetik elektron meningkat. Ketika tereksitasi ke tingkat singlet, molekul PS akan berusaha menormalkan keadaan dengan cara mentrasfer sebagian elektron dan melepas sejumlah energi ke lingkungan maupun ke molekul lain yang dilaluinya. Salah satu peluang yang dapat terjadi yaitu berinteraksi dengan substrat atau molekul oksigen yang menyebar diudara.

Tabel 2.1 menggambarkan jalur dan mekanisme yang dilalui molekul PS dalam satu siklus perpindahan kuantum elektron. Dari tingkat dasar (S^0) menuju tingkat singlet eksitasi (S^*) bertransisi ke tingkat triplet (T) dan kembali ke tingkat dasar. Selama penyinaran berlangsung, siklus yang dijalani molekul PS berlangsung berulang dan peluang reaksi kimia juga semakin besar. Banyaknya kadar molekul PS mempengaruhi jumlah produksi senyawa ROS. Karakteristik quantum yield molekul juga mempengaruhi lamanya keberadaan molekul PS di tingkat triplet untuk bisa bereaksi dengan molekul oksigen. Pada kenyataannya, molekul oksigen alami berada pada tingkat triplet sehingga kecukupan konsentrasi oksigen di dalam maupun disekitar jaringan sel target mampu meningkatkan efek fotoinaktivasi melalui pembentukan senyawa ROS yang lebih banyak.

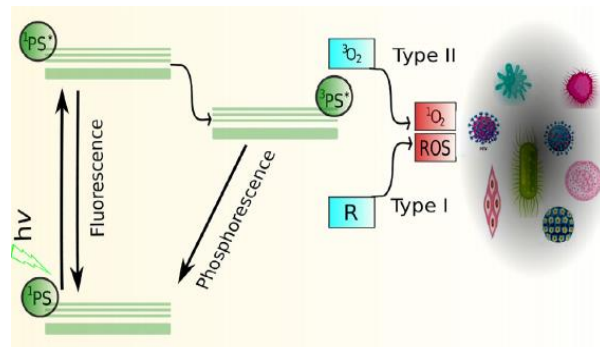
Mekanisme dalam Tabel 2.1 terdiri dari eksitasi, peluruhan elektron secara radiatif (yaitu pelepasan emisi fluoresen dan fosforesen) serta peluruhan elektron secara non radiatif berupa transisi tingkat energi, pembentukan senyawa ROS tipe I dan tipe II di tingkat triplet yang dicirikan sebagai radikal bebas (Tipe I) atau transfer eksitasi energi menjadi molekul oksigen (Tipe II) serta keberadaan karotenoid dalam pigmen klorofil yang dapat mengalami reaksi melawan aktivitas senyawa ROS [25].

Terkhusus pada kinetika karotenoid ini, dalam eksperimen untuk menghasilkan suatu senyawa klorofil dari ekstrak, dilakukan pemisahan antara pigmen klorofil dengan karotenoid melalui proses partisi (langkah kedua dari proses isolasi klorofil setelah maserasi). Hal ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh karotenoid yang nantinya dapat mengganggu aktivitas klorofil membentuk senyawa ROS yang sangat diperlukan dalam fotoinaktivasi.

II.2 Mekanisme Fotodinamik Inaktivasi (PDI)

Seorang fisikawan Polandia bernama Aleksander Jablonski pada tahun 1933 merancang tiga energi-diagram level dalam upaya untuk menggambarkan fenomena luminesensi dari banyak senyawa organik. Diagram ini biasa disebut diagram Jablonski [22]. Diagram Jablonski digambarkan sebagai tahap-tahap proses transisi elektronik suatu molekul yang mendapatkan energi tambahan

setelah menyerap cahaya. Kelanjutan dari mekanisme Jablonski ini, menunjukkan posisi dimana proses fotobiologi dari mekanisme PDI berlangsung.



Gambar 2.1 Mekanisme Fotodinamik Inaktivasi (PDI) [21].

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa selama proses eksitasi molekul, energi yang diserap menyebabkan terjadi kelebihan energi dan secara spontan molekul berpindah tingkat dari *ground state* (dasar) ke tingkat eksitasi (*singlet state*). Jangkauan molekul PS tereksitasi bergantung pada besarnya foton yang di serap, jika yang di serap energi foton yang lebih besar maka akan eksitasi mencapai ke singlet S_2 (contoh cahaya biru), jika yang di serap lebih rendah (contoh cahaya merah) maka eksitasi akan mencapai tingkat singlet S_1 . Ketidakstabilan molekul PS di tingkat S_1 atau S_2 menyebabkan molekul PS cenderung kembali ke tingkat awal (S_0), tetapi terdapat daerah terlarang untuk berpindah langsung ke S_0 . Dalam sistem kuantum mengharuskan molekul PS harus berpindah ke tingkat triplet, dimana molekul PS dapat berintraksi dengan molekul oksigen dan membentuk senyawa radikal dan ROS. Senyawa ROS diyakini sangat reaktif terhadap sel-sel yang memiliki sifat pembelahan yang cepat seperti sel kanker dan mikroorganisme [22].

II.3 Laser dalam Fotodinamik Terapi

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Laser) ialah radiasi yang dipancarkan akibat stimulasi dari cahaya yang diperkuat. Laser banyak digunakan untuk fotodinamik terapi, karena dapat menghasikan cahaya dengan *bandwidth* yang sempit (monokromatik) dan koheren. Dalam mekanisme

Photodynamic Inactivation (PDI), laser optimal digunakan karena keterlibatan PS yang memiliki karakteristik serapan energi foton di beberapa panjang gelombang tertentu, sehingga untuk sumber cahaya dapat dipilih atau dapat disesuaikan dengan panjang gelombang tertentu.

Sinar laser dapat digabungkan secara efisien menjadi serat optik dengan cara menggunakan aplikasi endoskopik. Sumber cahaya *non*-laser memancarkan spektrum cahaya yang luas sehingga pada PDT disaring untuk mendapatkan pita di sekitar panjang gelombang yang dibutuhkan. Cahaya *non*-laser tidak sepenuhnya monokromatik sehingga kurang efisien dalam proses fotosensitizer dan akibatnya lebih banyak lagi energi yang dibutuhkan dibandingkan dengan cahaya laser untuk mencapai efek biologis yang sama [10].



Gambar 2.2 Laser Diode

Sinar laser bersifat monokromatik yaitu menghasilkan spektrum cahaya dengan panjang gelombang tertentu (satu nilai panjang gelombang), lebih fokus dan tidak menyebar, energi lebih stabil. Warna cahaya laser ada yang tampak (UV, merah, biru, hijau, kuning dsb) dan ada yang tidak terlihat (inframerah). Kunci keberhasilan dalam *Photodynamic Inactivation* (PDI) adalah kesesuaian panjang gelombang laser dengan karakteristik serapan molekul PS. Untuk menghasilkan suatu proses fotosensitisasi yang optimal [18].

II.4 Daun Jarak Pagar (*Jatropha curcas L.*) dan Daun Pepaya (*Carica papaya L.*) sebagai Agen Antimikroba dan Fotosensitizer

Tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas L.*) termasuk famili *Euphorbiaceae* yang berasal dari daerah tropik Amerika. *Jatropha Curcas* memiliki kandungan senyawa kimia (fitokimia) seperti *steroid*, *saponin*, *saponin triterpenoid*,

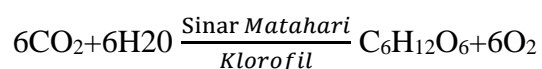
terpenoid, karatenoid, flavonoid, tannin, phlobatanins, glikosida, coumarin, alkaloid dan polyphenol [11, 12]. Tanaman pepaya (*Carica papaya L.*) merupakan tanaman buah yang berasal dari Amerika dan Hindia. Daun pepaya memiliki konsentrasi klorofil total tertinggi yaitu 29,5975 mg/g [2].



Gambar 2.3 (a) Daun jarak pagar (*Jatropha curcas L.*) dan (b) Daun pepaya (*Carica papaya L.*)

Daun jarak pagar (*Jatropha curcas L.*) dan daun pepaya (*Carica papaya L.*) memiliki klorofil dan senyawa turunannya sangat baik digunakan sebagai fotosensitizer karena dapat menyerap panjang gelombang sinar tampak [14, 2]. Fotosensitizer dapat didefinisikan sebagai senyawa kimia dengan sifat yang mampu menyerap energi cahaya pada panjang gelombang tertentu, serta menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS). [15].

Klorofil memiliki efek menarik elektron dari sinar matahari agar fotosintesis terjadi. Struktur kimianya menyerupai heme, senyawa cincin dalam hemoglobin, di mana sumbu Fe dalam heme digantikan oleh Mg. Klorofil bertindak sebagai penyerap energi dari sinar matahari, sehingga mengubah menjadi molekul berenergi tinggi yang dapat menghilangkan elektron dari molekul air dan proton dari oksigen. Reaksi kimia fotosintesis adalah sebagai berikut [26]:



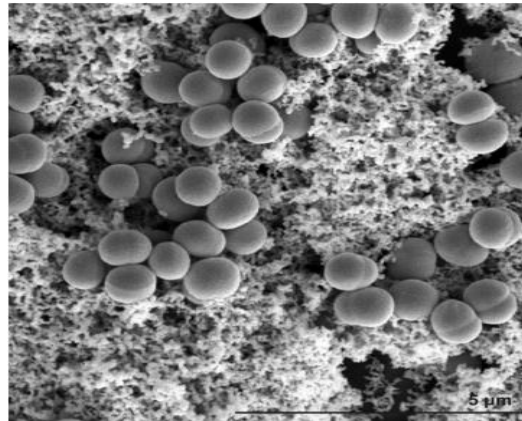
Ada 2 fotosistem: klorofil pada fotosistem 1 dan klorofil pada fotosistem 2. klorofil pada fotosistem 1 menyerap cahaya gelombang panjang (merah) dan

klorofil pada fotosistem 2 menyerap cahaya gelombang pendek pada fotosistem 2. fotosistem 1. terdiri dari klorofil 2 yaitu klorofil a dan b. Klorofil a: $C_{55}H_{72}O_4N_4Mg$ mg dan klorofil b: $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$. Perbedaan kedua klorofil ini terletak pada jumlah atom H dan O. Klorofil a menyerap gelombang panjang dan cahaya sedangkan pada klorofil b hanya menyerap cahaya gelombang pendek [26].

II.5 Biofilm *Staphylococcus epidermidis*

Pembentukan biofilm dikenal sebagai faktor kunci untuk evolusi dan persistensi infeksi perangkat yang tinggal di dalamnya. Bakteri yang menempel pada permukaan implan menghasilkan matriks glikokaliks terhidrasi kompleks yang menyelubungi bakteri. Lapisan ini disebut biofilm dan memungkinkan bakteri berkoloni untuk menghindari pertahanan kekebalan atau pengobatan antibiotik [15]. *Staphylococcus epidermidis* dapat membentuk biofilm dan merupakan patogen pada manusia karena koeksistensi *Staphylococcus epidermidis* pada bakteri Kutikula Jerawat berlimpah di kulit manusia yang sehat tetapi biofilm biasanya tidak terbentuk di area tersebut [16].

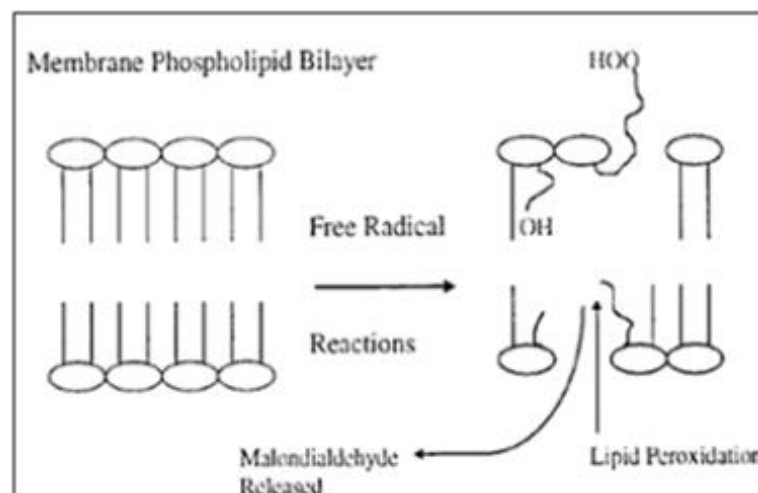
Pembentukan biofilm yang signifikan ada dua tahap utama *Staphylococcus sp.*, yakni adhesi bakteri ke permukaan padat, diikuti oleh pertumbuhan terkait akumulasi sel yang menghasilkan beberapa lapisan sel kluster. Pada *S. epidermidis*, pembentukan lapisan sel telah berkaitan khusus pada mekanisme adhesi sel ke sel yang terkait dengan β -1,6-polisakarida glikosaminoglikan dan dikenal sebagai *polysaccharide intercellular adhesin* (PIA). Protein terlibat pada sintesis matriks polisakarida diatur oleh lokus gen *ica* pada *S. epidermidis*, yakni lokus yang dikonservasi pada *S. epidermidis*, *S. aureus* dan *Staphylococcus sp.* terkait filogenetik lainnya. *S. epidermidis* dan *S. aureus* menunjukkan efek multi-faktor pada tahap adhesi, dan itu tergantung pada sifat fisik dan kimia bahan polimer biomedis dan sifat permukaan sel bakteri. Secara khusus, hidrofobisitas dan muatan elektrostatik mempengaruhi interaksi antara polimer dan permukaan sel bakteri [28].



Gambar 2.4 Gambar SEM Biofilm *S. epidermidis*

II.6 Malondialdehyde (MDA)

Malondialdehyde (MDA) adalah metabolit yang dihasilkan oleh peroksidasi lipid yang disebabkan oleh radikal bebas. Ketika radikal hidroksil seperti *Reactive Oxygen Species* (ROS) bereaksi dengan komponen asam lemak dari membran sel, *Malondialdehyde* (MDA) terbentuk, yang mengarah ke reaksi berantai yang disebut peroksidasi lipid. Peroksidasi lemak dapat memecah rantai asam lemak menjadi berbagai senyawa toksik sehingga menyebabkan kerusakan pada membran sel.. Mekanisme lengkap pembentukan senyawa MDA diilustrasikan pada Gambar 2.5.

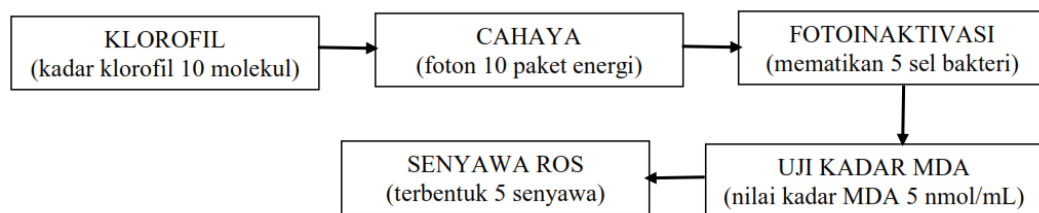


Gambar 2.5 Skema pembentukan senyawa MDA [29]

Gambar 2.5 menunjukkan membran sel yang terdiri dari dua lapisan fosfolipid. Struktur lipid terdiri dari kelompok ikatan rangkap atau tunggal antara

karbon dan karbon. Oksigen C=O atau C=OH. Radikal bebas bereaksi dengan ikatan rangkap atau ikatan tunggal pada gugus fungsi dan menyebabkan pelepasan ikatan OH maupun OOH. Beberapa komponen struktural dilepaskan dalam bentuk oksidasi lipid seluler menghasilkan produk akhir berupa MDA [2].

Prinsip pembentukan senyawa MDA setelah terjadi lisis lipid sel akibat serangan senyawa radikal menjadi acuan sederhana sebagai metode estimasi tingkat senyawa ROS yang terbentuk selama proses PDI bakteri patogen. Gambaran sederhana kaitan antara kadar klorofil, foton cahaya, pembentukan senyawa ROS, inaktivasi sel bakteri, kadar MDA mengikuti diagram berikut:



Gambar 2.6 Skema kaitan antara perlakuan PDI- jumlah senyawa ROS dan Produksi kadar MDA

Gambar 2.6 Memberikan pemahaman asumsi bahwa dalam pengaplikasian system PDI untuk terapi/menghambat pertumbuhan atau bahkan hingga mematikan sel mikroba. Asumsi yang diuraikan bahwa ketika sejumlah foton cahaya diradiasikan dipermukaan molekul fotosensitizer, maka terjadi proses penyerapan dan transisi elektronik. Jika terdapat 10 molekul klorofil (PS). Secara ideal, dikatakan setiap molekul berpeluang menyerap satu energi foton cahaya. Selanjutnya, jika hasil penonaktifan metabolisme sel menghasilkan kematian sel sebanyak 5 bakteri dan hasil deteksi uji kadar MDA diperoleh 5 nmol/mL maka dapat diestimasi jumlah senyawa ROS yang diproduksi selama proses fotoinaktivasi berlangsung. Nilai kadar MDA 5 nmol/mL mengindikasikan terdapat minimal 5 molekul senyawa ROS yang diproduksi.