



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



SPEKTROSKOPI MOLEKUL DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL MAJU

**Menerawang ke Dunia Material yang Tak Terlihat
pada Tingkat Molekuler**

Profesor Veinardi Suendo

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
21 September 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**SPEKTROSKOPI MOLEKUL
DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL
MAJU: MENERAWANG KE DUNIA
MATERIAL YANG TAK TERLIHAT
PADA TINGKAT MOLEKULER**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**SPEKTROKOPI MOLEKUL
DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL
MAJU: MENERAWANG KE DUNIA
MATERIAL YANG TAK TERLIHAT
PADA TINGKAT MOLEKULER**

Prof. Veinardi Suendo

21 September 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Spektroskopi Molekul dalam Pengembangan Material Maju: Menerawang ke Dunia Material yang Tak Terlihat pada Tingkat Molekuler

Penulis : Prof. Veinardi Suendo

Reviewer : Prof. I Made Arcana

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-571-2

e-ISBN : 978-623-297-572-9 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**"Hanya kepada Engkau lah kami menyembah dan hanya kepada Engkau lah kami
mohon pertolongan. Tunjukilah kami jalan yang lurus."**

(QS. Al-Fatihah: 5-6)

Kupersembahkan kepada kedua orang tua, kakak, istri, serta keluarga besarku yang
tercinta yang senantiasa mendukungku ke arah kebaikan.

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah robbil 'alamin, segala puji dan sembah hanyalah bagi Allah Swt., Tuhan yang menciptakan semesta alam. Penulis bersyukur dan berterima kasih atas segala rahmat, karunia, dan izin-Nya yang memungkinkan penulis untuk menyelesaikan buku orasi ilmiah ini. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada Forum Guru Besar – Institut Teknologi Bandung yang telah memberi kesempatan dalam menyusun buku orasi ilmiah ini. Ucapan terima kasih dan penghargaan juga penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penyelesaian karya ini.

Buku ini mencatat sebagian besar hasil pemikiran, hasil penelitian, pemahaman, serta pengalaman dari penulis dalam bidang spektroskopi molekuler, terutama yang terkait dengan pengembangan material maju. Semenjak menempuh pendidikan S-3 di Prancis, di Ecole Polytechnique, secara tidak sengaja penulis telah dijebloskan ke dalam bidang spektroskopi molekuler oleh pembimbing penulis, yaitu Prof. Pere Roca i Cabarrocas. Penulis masih mengingat dengan jelas bagaimana penulis mempelajari teknik *spectroscopic ellipsometry*, spektroskopi hamburan Raman, spektroskopi absorpsi inframerah, dan spektroskopi emisi optik plasma, dan spektroskopi emisi fotoluminesensi dari awal yang mencakup instrumentasi, teknik persiapan sampel, pengolahan data, dan bahkan aspek teoretis. Penulis masih mengingat bagaimana penulis pontang-panting bertanya ke semua orang di *Laboratoire des Interfaces et des couches minces* tanpa merasa malu mengenai semua hal itu. Penulis terus bersyukur pada Allah Swt. jika mengingat hal ini, bagaimana penulis telah dipertemukan dengan seorang patron yang telah membimbing tanpa pamrih dan telah memperkenalkan penulis pada bidang ilmu spektroskopi molekuler.

Bersama buku ini, penulis berharap dapat berbagi berbagai hal berkenaan dengan spektroskopi molekuler yang belum sempat diajarkan secara formal kepada para murid di lingkungan Institut Teknologi Bandung. Penulis juga berharap buku ini dapat menjadi wawasan tambahan bagi rekan-rekan yang berkerja pada bidang-bidang ilmu yang beririsan dengan

spektroskopi molekuler, terutama pada aplikasinya dalam mengembangkan material maju. Semua ini diharapkan dapat menjadi sebuah informasi yang berharga bagi para seluruh civitas akademika dan peneliti, dalam menerawang struktur dan sifat material pada tingkat atom dan molekul, guna menyongsong kemajuan teknologi yang berkembang dengan sangat pesat.

Demikian, besar harapan kami, semoga apa yang telah kami tuangkan dalam tulisan ini dapat bermanfaat bagi masyarakat luas serta berkontribusi dalam pengembangan sains dan teknologi di Indonesia.

Bandung, 21 September 2024

Penulis

SINOPSIS

Buku orasi ilmiah ini memaparkan sejumlah hasil penelitian dan pemikiran yang diselingi oleh pemahaman dan pengalaman penulis selama berkecimpung dalam bidang spektroskopi molekuler, terutama yang terkait dengan pengembangan material maju. Penulis berusaha memaparkan secara sederhana, sebagaimana pengetahuan ini diserap dalam bentuk yang sederhana pula oleh penulis. Berbagai aspek spektroskopi molekuler coba digali dari sisi fundamental, praktis, dan sederhana yang mungkin terlupakan karena dianggap lumrah pada bidang spektroskopi molekuler. Tidak hanya dari segi teoretis, tapi juga dari sisi instrumentasi, eksperimental, pengolahan data, dan aplikasi telah diuraikan pada buku orasi ilmiah ini. Berbagai peristilahan asing telah coba diterjemahkan secara sederhana ke dalam Bahasa Indonesia ilmiah yang baik dan benar sehingga mudah untuk dipahami.

Pada bagian pendahuluan akan dipaparkan latar belakang dan strategi riset dalam sains material yang menjadi paradigma umum dalam pengembangan material maju. Paradigma ini menjadi tantangan bagi bidang ilmu spektroskopi molekuler untuk berkiprah dan memberikan solusi. Bab ini akan memberikan gambaran umum seberapa penting peranan spektroskopi molekuler dalam bidang sains material, khusus dalam pengembangan material maju yang meliputi pemahaman dan kontrol pada tingkat atom dan molekul.

Bab berikutnya akan membahas keanekaragaman struktur molekul dan morfologi partikel. Kedua hal ini akan berperan sebagai tulang punggung dalam mengembangkan material maju dengan berbagai sifat unggul. Muncul pertanyaan pertama, yaitu bagaimana kita dapat mengamati keanekaragaman struktur tersebut. Pertanyaan ini kemudian disusul oleh pertanyaan berikutnya yang mempertanyakan korelasi antara struktur dan sifat-sifat unggul yang diamati. Setelah korelasi tersebut dipahami, akan muncul pertanyaan selanjutnya, yaitu bagaimana struktur-struktur tersebut dapat disintesis atau dapat difabrikasi dalam bentuk devais, yang tentu kembali membutuhkan control pada tingkat atom dan molekul.

Sebelum menguasai kontrol, terlebih dahulu peneliti harus mampu melakukan pengamatan pada tingkat atom dan molekul. Semua benda yang akan diamati tidak terlihat oleh mata telanjang, bahkan tidak diamati oleh mikroskop

optik yang umum kita gunakan. Pada bab ini peran teknik spektroskopi molekuler dibandingkan dengan teknik mikroskopi yang juga terus berkembang. Memang mikroskop optik biasa tidak mampu mengamati material nano, apalagi mengamati atom dan molekul. Akan tetapi berbagai teknik mikroskopi mutakhir mampu, bagaimana keunggulannya terhadap berbagai teknik spektroskopi molekuler? Apakah dengan berbekal teknik mikroskopi saja cukup bagi peneliti untuk menerawang ke tingkat atom dan molekul?

Interaksi antara cahaya dan materi menjadi dasar dari spektroskopi molekuler. Interaksi utama yang menjadi dasar dari spektroskopi molekuler adalah proses absorpsi dan hamburan. Kedua proses ini akan meliputi berbagai transisi yang kompleks, yang terjadi saat cahaya berinteraksi dengan *object under study*, termasuk atom dan molekul penyusun suatu material maju. Panjang gelombang cahaya atau energi foton yang digunakan pada teknik spektroskopi molekuler dalam mempelajari material maju mencakup rentang yang luas, yaitu UV (*ultraviolet*), sinar tampak (*visible*), inframerah dekat (*near infrared* – NIR), inframerah tengah (*mid infrared* – MIR), dan inframerah jauh (*far infrared* – FIR). Rentang yang lebar ini akan mencakup semua teknik spektroskopi optis dan vibrasional yang akan dipaparkan secara detail.

Dibahas pula beberapa contoh kasus dari sekian banyak pengalaman penulis mengaplikasikan spektroskopi molekuler sebagai suatu alat dalam memecahkan masalah dalam mengembangkan material maju. Kasus dalam memecahkan mekanisme pembentukan partikel silika berstruktur nano yang bermorfologi *bicontinuous concentric lamellar (bcl)* menjadi salah satu kisah sukses, di mana dengan memahami mekanisme pembentukan, peneliti mampu untuk mensintesis berbagai partikel dengan morfologi serupa dari berbagai material yang berbeda. Hal ini membuka peluang atau kemungkinan yang tak terhingga dalam pengembangan material maju dengan mengembangkan berbagai struktur molekul dan morfologi.

Pada akhir buku ini, dipaparkan pendapat penulis tentang masa depan spektroskopi molekuler, yang diprediksi akan menerawang dinamika pada tingkat atom dan molekul lewat teknik spektroskopi molekuler terurai waktu (*time-resolved molecular spectroscopy*). Dibahas pula pandangan masa depan dalam perkembangan spektroskopi molekuler di Indonesia beserta harapan penulis terkait kemandirian teknologi, khususnya kemandirian pada bidang spektroskopi molekuler melalui berbagai *start-up* dan industri nasional.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	VII
SINOPSIS	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR	XIII
DAFTAR TABEL.....	XXI
1 PENDAHULUAN	1
2 KEANEKARAGAMAN STRUKTUR MOLEKUL DAN MORFOLOGI PARTIKEL DALAM MATERIAL MAJU.....	5
3 PERBEDAAN MIKROSKOPI DAN SPEKTROSKOPI.....	9
4 INTERAKSI CAHAYA DAN MATERI.....	13
5 SPEKTROSKOPI OPTIS.....	17
6 SPEKTROSKOPI VIBRASIONAL.....	29
7 BERBAGAI APLIKASI SPEKTROSKOPI MOLEKUL DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL MAJU.....	51
8 MASA DEPAN SPEKTROSKOPI MOLEKUL: MENERAWANG DINAMIKA MOLEKUL	67
9 PENUTUP.....	73
10 UCAPAN TERIMA KASIH	75
DAFTAR PUSTAKA.....	79
CURRICULUM VITAE.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Visualisasi tiga dimensi keragaman kimia baru dalam TCAMS (<i>Tres Cantos antimalarial compound set</i>) (Gamo dkk., 2010).....	6
Gambar 2	Pencitraan AFM molekul pentasena (Gross dkk., 2009).	9
Gambar 3	Kombinasi pengukuran spektroskopi nc-AFM dan STM pada rantai polimer terkonjugasi (Riss dkk., 2014).....	10
Gambar 4	Kontras intermolekul dalam susunan ikatan hidrogen 2D (Sweetman, dkk., 2014).	11
Gambar 5	Perbandingan antara gambar STM, AFM, serta struktur molekul dari reaktan dan produk (De Oteyza dkk., 2013).....	12
Gambar 6	Skema pengamatan optik untuk mempelajari sifat-sifat suatu benda melalui interaksinya dengan cahaya.....	13
Gambar 7	Fenomena yang mungkin terjadi akibat Interaksi antara cahaya dengan materi (Valeur, 2001).....	14
Gambar 8	Jalur de-eksitasi yang mungkin untuk molekul yang tereksitasi (Valeur, 2001).....	14
Gambar 9	Spektrum dari sebuah gelas berwarna hijau pada panjang gelombang yang berbeda (Western University, 2024).....	15
Gambar 10	(a) Sayap kupu-kupu di bawah mikroskop (<i>A butterflys wings under a microscope</i> , t.t.) dan (b) tumpahan minyak solar di jalan raya (John, 2007).....	16
Gambar 11	Skema pengaturan optik spektrofotometer UV-Vis (IMPLEN, 2024).....	17
Gambar 12	Skema yang menggambarkan prinsip monokromator (Shimadzu, 2024).....	18
Gambar 13	Pengukuran spektroskopi absorpsi: (a) konfigurasi transmisi difus (<i>diffuse transmission</i>), (b) reflektansi difus (<i>diffuse reflectance</i>), dan (c) transmisi spekular (<i>specular transmission</i>) (Orera dan Merino, 2015).....	19
Gambar 14	Skema pengukuran spektrum emisi pada spektrofotometer (Edinburgh Instruments, 2024a).	20

Gambar 15	Skema pengukuran spektrum eksitasi pada spektrofлуorometer (Edinburgh Instruments, 2024a).....	21
Gambar 16	Diagram Perrin-Jablonski (Berberan-Santos, 2001; Edinburgh Instruments, 2024b; Lakowicz, 2006; Valeur dan Brochon, 2001).	22
Gambar 17	(a) Aleksander Jabłoński (1898-1980), (b) Jean Baptiste Perrin (1870-1942), dan (c) Francis Perrin (1901-1992) (Berberan-Santos, 2001; Edinburgh Instruments, 2024b; Lakowicz, 2006; Valeur dan Brochon, 2001).	22
Gambar 18	Perbedaan proses fluoresensi dan fosforesensi berdasarkan (a) <i>lifetime</i> emisi dan (b) transisi elektronik dengan multiplisitas spin yang berbeda (Atkins dan Paula, 2006).....	24
Gambar 19	(a) Geseran Stokes atau Stokes- <i>shift</i> (Valeur, 2001), (b) George Gabriel Stokes (1819-1903) (Stokes, 1852), dan (c) spektrum absorpsi dan fluoresensi bagi zat warna Rhodamine 6G dan (Dicyanomethylene)-2-methyl-6-(4-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM) (Edinburgh Instruments, 2024d).	25
Gambar 20	(a) Michael Kasha (1920–2013) dan (b) molekul antrasena dalam sikloheksana yang dieksitasi pada berbagai tingkat elektronik dan vibrasional (Edinburgh Instruments, 2024c; Lewis dan Kasha, 1944).	26
Gambar 21	Tiga gerak vibrasi dasar dari molekul linear triatomik, yang diwakilkan oleh molekul CO ₂ (Long, 2002).	30
Gambar 22	Gerak vibrasional dasar atau mode normal dari suatu molekul non-linear triatomik yang diwakilkan oleh molekul air (Long, 2002).....	33
Gambar 23	Transisi di antara tingkat-tingkat energi vibrasional pada suatu molekul diatomik dalam bentuk Diagram Perrin-Jablonski yang disederhanakan. Energi foton yang digunakan untuk mengeksitasi molekul tersebut meningkat dari kiri ke kanan, beserta perkiraan perolehan kuantum (<i>quantum yield</i>) dari masing-masing proses: (a) absorpsi inframerah, (b) hamburan Raman pada daerah near inframerah (NIR-Raman), (c) hamburan Raman pada daerah sinar tampak (Vis-	

	Raman), (d) hamburan Raman resonansi, (e) fluoresensi, (f) hamburan Raman pada daerah UV (UV-Raman) (Rzhevskii, 2021).....	34
Gambar 24	(a) C. V. Raman mendemonstrasikan alat spektrograf yang digunakan dalam mengamati proses hamburan Raman (Indiatimes, 2021), (b) spektrograf yang digunakan C. V. Raman dan K. S. Krishnan dalam mengamati hamburan Raman, (c) spektrum garis pada plat foto yang menggambarkan hamburan Raman (Raman dan Krishnan, 1928).	35
Gambar 25	Detail spektrum garis yang diamati oleh C. V. Raman dan K. S. Krishnan menggunakan spektrograf yang mereka rancang (Gambar 24b), di mana (a) hanya cahaya pengekstipasi dan (b) dengan keberadaan sampel. (c) Plot dari spektrum garis pada (b) menggambarkan dari kiri ke kanan hamburan anti-Stokes, Rayleigh, dan Stokes (Long, 2002).	36
Gambar 26	Skematis proses hamburan cahaya oleh molekul yang menghasilkan dua jenis hamburan yaitu: hamburan elastis (Rayleigh) dan inelastis (Raman). Hamburan Raman sendiri dibagi menjadi hamburan Stokes dan anti-Stokes, di mana Stokes memiliki energi yang lebih rendah dari energi cahaya pengekstipasi, sedangkan hamburan anti Stokes memiliki energi yang lebih tinggi. Proses fluoresensi yang melalui proses absorpsi juga dipaparkan sebagai pembandingan (Mosca, dkk., 2021).....	37
Gambar 27	Skematis proses hamburan cahaya oleh molekul menggunakan model gelombang: (a) Radiasi foton yang datang menginduksi momen dipol dari molekul agar beresilasi pada frekuensi foton tersebut, (b) vibrasi molekul yang dapat mengubah kebolehpolaran (<i>polarizability</i>), yang akan mengubah amplitudo dari osilasi momen dipol molekul, (c) osilasi momen dipol yang termodulasi amplitudo, dan (d) komponen yang beresilasi dan beramplitudo tetap dalam molekul yang	

	dapat mengemisikan radiasi gelombang elektromagnetik (Larkin, 2011).	38
Gambar 28	Proses hamburan Raman yang biasa terjadi pada sistem molekuler: (a) hamburan Raman biasa (<i>normal Raman scattering</i>), (b) hamburan Raman pre-resonansi (<i>pre-resonance Raman scattering</i>), (c) hamburan Raman resonansi diskrit (<i>discrete resonance Raman scattering</i>), dan (d) hamburan Raman resonansi kontinum (<i>continuum resonance Raman scattering</i>) (Long, 2002).....	39
Gambar 29	Interferometer Michelson dengan menggunakan pemisah cahaya (<i>beam splitter</i>) berupa (a) plat (<i>plate</i>) dan (b) kubus (<i>cube</i>) dapat mendispersikan cahaya putih berdasarkan panjang gelombangnya yang teramati sebagai warna pelangi pada layar (aurantiaca, 2012).....	40
Gambar 30	Skematis desain alat spektrometer <i>Fourier Transform Infrared</i> atau FT-IR yang terdiri atas sumber cahaya (<i>light source</i>) inframerah, laser He-Ne (merah), interferometer (<i>interferometer Michelson</i>), wadah sampel (<i>sample chamber</i>), dan detektor (<i>detector</i>) (Yusuf, 2023).	41
Gambar 31	Desain meja optis (<i>optical bench</i>) untuk alat spektrometer <i>Fourier Transform Infrared</i> atau FT-IR (Arulmozhi, 2007).	42
Gambar 32	Prosedur konstruksi spektrum absorpsi pada spektroskopi FT-IR. Konstruksi spektrum awali dengan transformasi Fourier terhadap masing-masing interferogram ketika wadah sampel kosong (<i>background</i>) dan berisi sampel (<i>sample</i>). Hasil transformasi Fourier dari kedua interferogram tersebut akan menghasilkan spektrum <i>background</i> dan <i>sample</i> . Hasil substraksi dari kedua spektrum tersebut menggunakan Persamaan 6.3 akan menghasilkan spektrum absorbansi yang diinginkan (Jafari, 2017).	43
Gambar 33	Skematis desain alat spektrometer Raman dispersif (Schmid dan Dariz, 2019).	44
Gambar 34	Spektrum transmisi dari ketiga jenis filter Raman, (a) filter garis laser (<i>laser-line filter</i>), (b) filter lolos gelombang panjang (<i>long-wave pass filter</i>) atau filter tepi	

	(<i>edge filter</i>), dan (c) filter takik (<i>notch filter</i>) (IDEX Health & Science, 2020).....	46
Gambar 35	Proses hamburan Raman dan emisi fluoresensi pada (a) domain frekuensi atau panjang gelombang dan (b) domain waktu (Rzhevskii, 2021).....	48
Gambar 36	(a) Misel biasa (Lemonick, 2019) dan (b) misel terbalik (De Angelis, 2024).....	51
Gambar 37	(a) Spektrum hamburan Raman emulsi dan komponen penyusul emulsi, (b) dekonvolusi spektrum hamburan Raman mode vibrasi regang OH air murni, (c) dekonvolusi spektrum hamburan Raman mode vibrasi regang OH emulsi (Febriyanti dkk., 2016), (d) spektrum hamburan Raman regang OH air dan es pada berbagai suhu (Cross, dkk., 1937), dan (e) struktur skematis dari berbagai jenis ikatan hidrogen pada molekul air yang memengaruhi mode vibrasi regang OH (Sun, 2013). (f) Ilustrasi keberadaan air terkungkung pada misel terbalik dengan analogi keberadaan air di dalam sel tanaman.	52
Gambar 38	Mekanisme polimerisasi monomer TEOS menjadi polisiloksan melewati tahap hidrolisis dan kondensasi sebelum berikatsilang dan membentuk padatan silika (SiO ₂).	53
Gambar 39	Mekanisme hidrolisis TEOS dan proses difusi dari TEOS terhidrolisis ke dalam misel terbalik yang disusul oleh proses polimerisasi kondensasi membentuk polisiloksan yang distabilkan oleh keberadaan gugus polar dari surfaktan.....	54
Gambar 40.	(a) Evolusi spektrum absorpsi inframerah selama proses hidrolisis kondensasi pada campuran emulsi, (b) plot absorbansi dari mode regang (3360 cm ⁻¹) dan tekuk (1650 cm ⁻¹) OH, dan (c) lebar puncak FWHM (<i>full width at half maximum</i>) dari mode regang (3360 cm ⁻¹) dan tekuk (1650 cm ⁻¹) OH (Febriyanti dkk., 2022).	55
Gambar 41	Analisis mikroskopi elektron terhadap serangkaian sampel kinetika klasik dari silika <i>bcl</i> dengan memvariasikan waktu sintesis: (a) FESEM (<i>field emission scanning electron microscopy</i>), (b) FIB-FESEM (<i>focused ion</i>	

	<i>beam – field emission scanning electron microscopy</i>), (c) HRTEM (<i>High resolution transmission electron microscopy</i>), dan (d) nilai profil abu-abu (<i>gray profile value</i>) dari (c) (Febriyanti, dkk., 2022).	56
Gambar 42	Mekanisme pembentukan partikel silika <i>bcl</i> yang mengikut tahap-tahap: hidrolisis-difusi, hidrolisis-kondensasi, dan segregasi fasa (Febriyanti dkk., 2016, 2022).....	57
Gambar 43	Gambaran umum mekanisme pembentukan berbagai partikel bermorfologi <i>bcl</i> yang telah dikembangkan berdasarkan mekanisme pembentukan partikel silika <i>bcl</i> (Benu, dkk., 2021; Febriyanti, dkk., 2016; Steky, dkk., 2019).....	57
Gambar 44	(a) Spektrum emisi luminesensi pada berbagai suhu pengukuran, (b) intensitas emisi terintegrasi sebagai fungsi suhu pengukuran, model kungkungan kuantum yang diwakili oleh (c) diameter molekul, dan (d) tebal molekul (Nurhayati dkk., 2020).	59
Gambar 45	Citra <i>scanning tunnelling microscopy</i> (STM) dari molekul TPP (<i>tetraphenylporphyrin</i>) yang dideposisikan diatas permukaan emas Au(111) yang menghasilkan lebar dan tebal molekul TPP masing-masing sekitar 9,8 Å dan 2,45 Å (Nurhayati dkk., 2020).	60
Gambar 46.	(a) Skematik proses pembentukan pola noda cincin kopi pada substrat DCDR, (b) citra mikroskop optik dari noda cincin kopi yang dipreparasi dari larutan TPP 1×10^{-4} M pada permukaan substrat ITO (<i>indium thin oxide</i>), (c) profil nilai abu-abu dari citra mikroskop noda cincin kopi yang ditunjukkan pada (b) (Milana dkk., 2021).....	62
Gambar 47	(a) Spektrum DCDR dari larutan TPP pada berbagai konsentrasi dibandingkan dengan spektrum hamburan Raman konvensional dari kristal padatan TPP, (b) Perbandingan antara spektrum DCDR yang dideposisikan dari larutan TPP 1×10^{-4} M di atas permukaan ^{47}Au (spektra kontinu berwarna hitam) dan spektrum hasil komputasi menggunakan teknik TDDFT (spektra garis merah). Puncak <i>overtone</i> dari Raman	

	teramati pada spektrum DCDR pada rentang 2000–3000 cm^{-1} akan tetapi tidak pada spektrum Raman hasil komputasi (Milana dkk., 2021).....	63
Gambar 48	Skematik fotodegradasi etilena menggunakan fotokatalis TiO_2 terdekorasi Mn pada rentang cahaya tampak dalam proses penundaan pematangan (<i>delayed ripening</i>) pisang (Nugroho dkk., 2024).	64
Gambar 49	Desain fotoreaktor yang digunakan untuk mengamati proses fotodegradasi etilena dengan menggunakan teknik spektroskopi FT-IR. (a) Sel fotoreaktor yang dilengkapi dengan dua jendela silikon (<i>silicon window</i>) dan saluran asupan gas (<i>gas inlet</i>). (b) Skematik fotoreaktor saat beroperasi di dalam spectrometer FTIR, di mana sampel fotokatalis disinari dengan menggunakan LED (<i>light emitting diode</i>), sedangkan perubahan komposisi gas di dalam sel fotoreaktor dimonitor oleh berkas inframerah dari spektrometer FT-IR (Nugroho dkk., 2024).	65
Gambar 50	(a) Beberapa kemungkinan zat antara hasil fotodegradasi etilen. (b) Perbandingan spektrum absorpsi IR dari beberapa antara zat antara dan spektrum yang dihasilkan setelah 2 jam penyinaran di bawah cahaya putih menggunakan fotokatalis TiO_2 terdekorasi Mn (TM-NaOH) (Nugroho dkk., 2024).....	66
Gambar 51	(a) Skematis desain alat spektrometer fluoresensi terurai waktu (<i>time-resolved fluorescence spectrometer</i>), dan (b) data hasil pengukuran dari spektrometer fluoresensi terurai waktu yang berupa respons instrumen (garis merah) dan data peluruhan intensitas (garis biru) (PicoQuant, 2024).	67
Gambar 52	Kerangka waktu dalam pengamatan spektroskopi fluoresensi terurai waktu, di mana setiap peristiwa ditandai dengan keberadaan sinyal pengeksitasi, dalam hal ini berupa lampu kilat (<i>flash lamp</i>). Waktu tunda (<i>delay time</i>) diatur agar diperoleh sinyal peluruhan yang bersih tanpa gangguan artefak dari peristiwa sebelumnya atau pun dari sinyal pengeksitasi. Setelah	

waktu tunda, pengamatan akan dimulai (*start of detection*) hingga akhir waktu pengamatan (*gate time*) yang menandakan pengamatan berakhir (*end of detection*). *Inset* menggambarkan proses eksitasi secara sekuensial yang menghasilkan data peluruhan yang sekuensial pula (Zieschang dkk., 2016)..... 68

Gambar 53 (a) Skematis teknik spektroskopi absorpsi transien (*flash photolysis*) yang dilengkapi dengan komponen penundaan dan *chopper* untuk pendeteksian tertunda bagi mode *pump-on/pump-off* secara sekuensial, (b) profil spektrum, dan (c) profil untuk berbagai proses yang berkontribusi pada absorpsi transien. (ESA, *Excited-state absorption* – absorpsi keadaan-tereksitasi; GSB, *Ground-state bleach* – proses pemutihan pada keadaan-dasar; SE, *Stimulated emission* – emisi terstimulasi; dan TA, *Transient absorption* – absorpsi transien) (Gupta dan Ozaki, 2020). 69

Gambar 54 Skematis teknik spektroskopi absorpsi vibrasional terurai waktu (*time-resolved absorption vibrational spectroscopy*): (a) konfigurasi berbasis spektrometer dispersif dan (b) konfigurasi berbasis interferometer (Gupta dan Ozaki, 2020). 70

Gambar 55 Skematis teknik spektroskopi terahertz domain-waktu dilengkapi *pump-probe* (*pump-probe time-domain terahertz spectroscopy*) (Advantest, 2024)..... 71

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Perbedaan antara teknik mikroskopi dan spektroskopi	11
Tabel 2	Perbandingan teknik spektroskopi hamburan Raman dan absorpsi inframerah (Larkin, 2011).	34

1 PENDAHULUAN

Perkembangan riset di bidang material telah mengalami lonjakan yang luar biasa dalam beberapa dekade terakhir. Hal ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan akan material unggul yang dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang yang luas. Berbagai industri mutakhir sangat bergantung pada material-material baru berkinerja tinggi, seperti industri elektronik, optik, telekomunikasi, transportasi, informasi, farmasi, kesehatan, pangan, pertanian, penyimpanan energi, dan energi alternatif.

Secara umum, riset dalam pengembangan material maju sering dilakukan secara masif. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah metode “*try-and-error*”. Pendekatan ini berfokus pada kinerja material yang dihasilkan berdasarkan variasi dan kombinasi dari berbagai faktor dalam sintesis material tersebut. Aspek “*why*” atau pemahaman dari sisi fisika dan kimia dari proses sintesis dan sifat material tersebut akan digali setelahnya. Metode ini menjadi salah satu pilihan yang mudah dan cepat karena tidak membutuhkan pemahaman yang sangat mendalam dari sisi fisika dan kimia. Hal yang terpenting adalah kemampuan untuk mengukur kinerja dari material yang dihasilkan serta memetakan berbagai faktor yang berpengaruh dalam sintesis material.

Pendekatan menggunakan strategi ini sekarang menjadi lebih mudah dan murah untuk dilakukan dengan dikembangkannya berbagai teknik *in silico* seperti *combinatorial chemistry* dan *machine learning* dalam mengembangkan material maju. Kedua teknik *in silico* ini menjadi mungkin untuk dilakukan karena saat ini telah tersedianya database yang mumpuni dan dapat dipercaya berkenaan dengan korelasi antara kinerja, sifat, dan berbagai faktor kontrol dalam sintesis material berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah terpublikasi. Dengan adanya teknik-teknik ini, proses pengembangan material menjadi lebih efisien dan terarah, memungkinkan para peneliti untuk menciptakan material dengan kinerja yang optimal dan sesuai dengan kebutuhan spesifik berbagai industri.

Selain itu, perkembangan teknologi komputasi dan analisis data juga turut mendukung kemajuan riset di bidang material. Dengan bantuan algoritma canggih dan kemampuan komputasi yang semakin kuat dan murah, para peneliti dapat melakukan simulasi dan prediksi yang lebih akurat mengenai

sifat dan kinerja material baru sebelum mereka diproduksi secara fisik. Hal ini tidak hanya menghemat waktu dan biaya, tetapi juga membuka peluang untuk inovasi yang lebih besar dalam menciptakan material-material baru yang dapat mengatasi tantangan global, seperti perubahan iklim dan kebutuhan energi yang berkelanjutan.

Pendekatan lain dalam pengembangan material maju adalah dengan metode ilmiah, di mana peneliti berusaha memahami mengapa suatu material berperilaku demikian. Pemahaman ini ditelaah dari sifat fisik dan kimia material tersebut, mencakup struktur molekul, struktur padatan, struktur elektronik, morfologi, serta tahapan dan kondisi sintesis atau fabrikasi. Berdasarkan pemahaman ini, para peneliti berhipotesis untuk menghasilkan material baru dengan kinerja yang lebih baik atau memperoleh material alternatif yang lebih murah dari sisi bahan baku maupun proses sintesisnya.

Tentunya, hipotesis tersebut akan diuji secara eksperimental dan diproduksi secara fisik hingga dihasilkan material dengan sifat dan kinerja yang diinginkan. Dalam tahapan metode ilmiah, sifat-sifat material baru dipelajari secara mendalam dengan memahami korelasinya terhadap strukturnya. Kemudian, ditelaah lebih lanjut strategi untuk memperoleh struktur tersebut berdasarkan tahapan-tahapan sintesis. Sejujurnya, strategi ini sangatlah ideal, namun cukup berat untuk direalisasikan secara utuh tanpa diselangi oleh metode “*try-and-error*”, mengingat masih banyak keterbatasan teknologi dan pemahaman pada tingkat molekuler yang harus dihadapi dalam sintesis material maju.

Namun, dengan kemajuan teknologi berupa perkembangan teknik eksperimental maupun teknik *in silico*, pendekatan metode ilmiah ini menjadi lebih terintegrasi dan efisien. Teknik-teknik ini memungkinkan peneliti untuk melakukan simulasi dan prediksi yang lebih akurat serta verifikasi yang cepat mengenai sifat dan kinerja material baru tanpa banyak melakukan eksperimen secara fisik. Hal ini tidak hanya menghemat waktu dan biaya, tetapi juga membuka luas peluang untuk mengembangkan material-material baru pada batas-batas keilmuan yang belum sempat dijamah hingga kini.

Dengan demikian, kombinasi antara metode ilmiah dan pendekatan “*try-and-error*” memberikan landasan yang kuat bagi pengembangan material maju. Kedua pendekatan ini saling melengkapi, di mana metode ilmiah

memberikan pemahaman mendalam dan sistematis, sementara metode “*try-and-error*” menawarkan fleksibilitas dan kecepatan dalam eksplorasi material baru. Sinergi antara kedua pendekatan ini, didukung oleh teknologi canggih dan database yang mumpuni, memungkinkan para peneliti untuk terus mendorong batasan inovasi dan menciptakan material dengan kinerja yang optimal untuk berbagai aplikasi industri.

Dalam aplikasi dunia nyata, kedua metode ini, yaitu metode ilmiah dan “*try-and-error*”, sering kali berjalan beriringan. Para peneliti umumnya menerapkan kedua metode ini secara simultan untuk mencapai hasil yang optimal. Dalam pengembangan material maju, kedua metode ini memerlukan alat yang sama, yaitu teknologi yang mampu membawa para peneliti untuk dapat menerawang ke dunia yang tidak terlihat, yaitu dunia pada tingkat nanometrik dan molekuler.

Secara umum, peneliti dapat menerawang atau mengamati ke dunia nanometrik dan molekuler dengan dua cara utama, yaitu melalui teknik mikroskopi dan spektroskopi. Teknik mikroskopi sudah sangat umum digunakan dalam karakterisasi material berukuran mikrometrik hingga nanometrik. Dengan teknik ini, ukuran, bentuk, dan morfologi dari berbagai partikel yang menyusun material maju dapat dikarakterisasi dengan baik. Saat ini, teknik mikroskopi telah berkembang hingga mampu menerawang hingga tingkat molekuler, meskipun masih terdapat berbagai kerumitan dan keterbatasan, seperti preparasi sampel, kesiapan peralatan, dan kondisi karakterisasi yang harus diperhatikan.

Di sisi lain, spektroskopi molekul mengamati interaksi antara molekul dan cahaya secara langsung. Teknik ini memungkinkan peneliti untuk secara langsung menerawang ke dunia tingkat molekuler. Namun, interpretasi data hasil pengamatan pada teknik spektroskopi molekul sering kali menjadi kendala utama, bahkan bisa menjadi “*bottle-neck*” dalam penelitian. Meskipun demikian, spektroskopi molekul memiliki potensi besar untuk menjadi mata bagi para peneliti dalam menerawang ke dunia tak terlihat pada tingkat nanometrik dan molekuler.

Dalam narasi ini, kami akan memaparkan bagaimana spektroskopi molekul berperan penting dalam penelitian material maju. Dengan menggunakan teknik ini, peneliti dapat mengungkap berbagai fenomena yang mengaitkan antara struktur dan sifat-sifat material. Misalnya,

bagaimana perubahan struktur molekuler dapat memengaruhi sifat mekanik, optik, atau elektronik dari material tersebut. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan ini, peneliti dapat merancang material dengan sifat-sifat yang diinginkan untuk berbagai aplikasi, mulai dari elektronik hingga biomedis.

Selain itu, perkembangan teknologi mikroskopi dan spektroskopi juga membuka peluang baru dalam penelitian material maju. Inovasi dalam teknik preparasi sampel, peningkatan resolusi alat, dan pengembangan metode analisis data yang lebih canggih, semuanya berkontribusi pada kemajuan dalam bidang ini. Dengan alat dan teknik yang semakin canggih, peneliti dapat mengeksplorasi dunia nanometrik dan molekuler dengan lebih detail dan akurat, membuka jalan bagi penemuan-penemuan baru yang dapat mengubah berbagai aspek kehidupan kita.

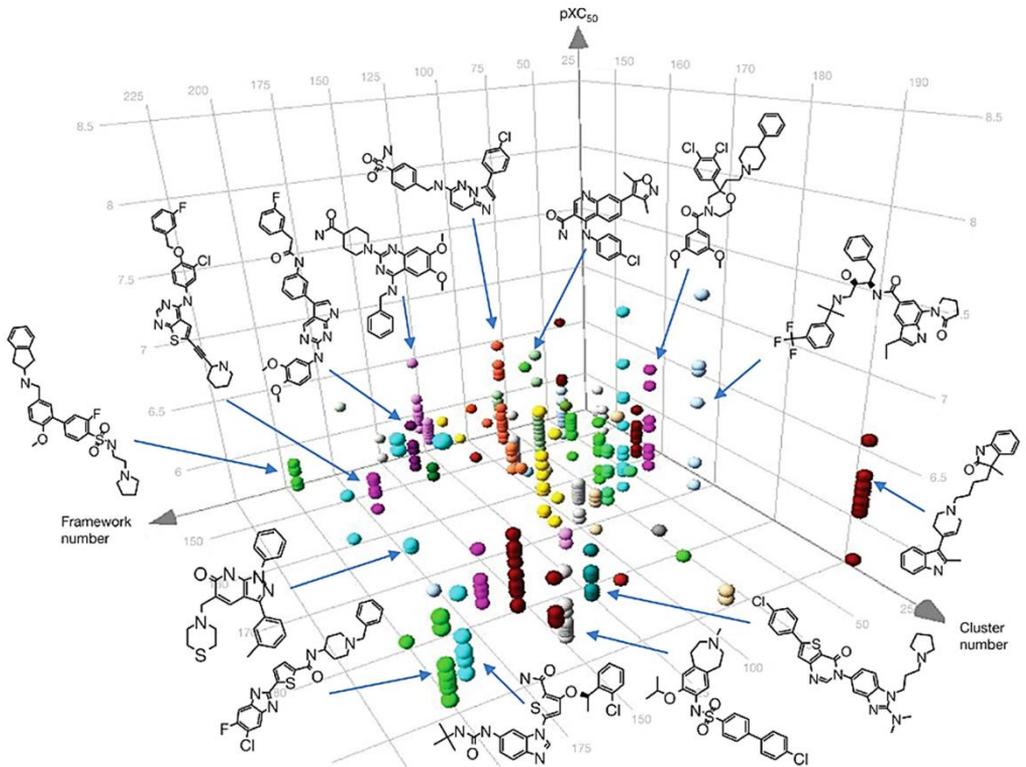
2 KEANEKARAGAMAN STRUKTUR MOLEKUL DAN MORFOLOGI PARTIKEL DALAM MATERIAL MAJU

Keanekaragaman struktur dan bentuk molekul adalah salah satu aspek paling menarik dalam bidang ilmu kimia. Molekul-molekul dapat memiliki berbagai bentuk dan ukuran, mulai dari molekul sederhana seperti air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2) hingga molekul kompleks seperti protein dan DNA. Struktur molekul sangat menentukan sifat dan fungsi dari molekul tersebut. Misalnya, struktur linier dari molekul karbon dioksida (CO_2) dan struktur berbentuk huruf “V” dari molekul air (H_2O) akan memberikan respons yang sangat berbeda terhadap cahaya pada rentang inframerah (IR). Perbedaan pada atom penyusun juga berkontribusi membuat molekul air dapat saling berikatan hidrogen yang menyebabkan air berwujud cair pada keadaan standar sedangkan CO_2 berwujud gas. Keberadaan ikatan hidrogen di antara molekul air juga akan berkontribusi pada berbagai fenomena menarik lain, seperti mengapa es terapung dalam air. Sementara protein suatu molekul berstruktur kompleks, mampu membentuk struktur primer, sekunder, tersier, dan kuarternary yang memungkinkan untuk melakukan berbagai fungsi biologis penting, seperti struktur penyangga, transpor, dan enzimatis.

Salah satu contoh keanekaragaman struktur molekul adalah isomerisme, di mana molekul dengan rumus kimia yang sama dapat memiliki struktur yang berbeda. Isomer dapat dibagi menjadi dua kategori utama: isomer struktural dan isomer stereoisomer. Isomer struktural memiliki atom-atom yang terhubung dalam urutan yang berbeda, sementara stereoisomer memiliki atom-atom yang terhubung dalam urutan yang sama tetapi dengan orientasi tiga dimensi yang berbeda. Contoh klasik dari isomer stereoisomer adalah glukosa dan galaktosa, yang keduanya memiliki rumus kimia $C_6H_{12}O_6$ tetapi berbeda dalam orientasi atom-atom hidrogen dan hidroksil di sekitar atom karbon tertentu. Keanekaragaman struktur molekul akan membuka keanekaragaman sifat dan fungsi dari masing-masing molekul tersebut, misalnya keanekaragaman struktur molekul berpengaruh terhadap aktivitas anti-malaria (Gambar 1) (Gamo dkk., 2010).

Keanekaragaman struktur dan bentuk molekul memainkan peran penting dalam pengembangan material maju. Material maju, seperti polimer, nanomaterial, dan komposit, memiliki struktur molekul yang dapat dirancang untuk memiliki sifat-sifat tertentu yang diinginkan. Misalnya, polimer dengan

rantai panjang dan bercabang dapat dirancang untuk memiliki kekuatan dan fleksibilitas yang tinggi, yang sangat berguna dalam aplikasi seperti bahan konstruksi dan perangkat medis. Nanomaterial, di sisi lain, dapat memiliki struktur berpori dengan permukaan yang sangat luas, yang memungkinkan material ini digunakan dalam aplikasi katalisis, adsorben, elektrode, dan penyimpanan energi.



Gambar 1 Visualisasi tiga dimensi keragaman kimia baru dalam TCAMS (*Tres Cantos antimalarial compound set*) (Gamo dkk., 2010).

Dalam pengembangan material maju, pemahaman yang mendalam tentang struktur molekul sangat penting. Struktur molekul menentukan bagaimana material tersebut berinteraksi dengan lingkungannya dan bagaimana sifat-sifat material tersebut dapat dimodifikasi. Misalnya, dengan mengubah struktur molekul dari suatu polimer, peneliti dapat mengubah sifat mekanik, termal, atau optik dari material tersebut. Hal ini memungkinkan pengembangan material dengan sifat-sifat yang disesuaikan untuk aplikasi tertentu, seperti material yang tahan terhadap suhu tinggi atau material yang memiliki konduktivitas listrik yang tinggi. Bahkan telah dikembangkan berbagai material yang memiliki sifat yang tidak lazim di alam, misalnya

material konduktor listrik umumnya adalah material yang juga konduktor termal. Namun telah dikembangkan material dengan konduktivitas termal tinggi, tetapi memiliki konduktivitas listrik yang rendah, hingga dikategorikan sebagai material insulator listrik.

Selain struktur molekul, morfologi partikel merupakan hal yang sangat penting dalam pengembangan material maju, terutama pada skala nano. Morfologi partikel mencakup berbagai aspek seperti bentuk, ukuran, dan struktur permukaan, yang semuanya dapat memengaruhi sifat fisik dan kimia material yang dihasilkan. Dalam konteks material nano, variasi morfologi dapat memberikan dampak signifikan terhadap kinerja material dalam berbagai aplikasi, mulai dari katalisis hingga penyimpanan energi dan sensor.

Pada bidang katalisis, morfologi partikel yang beragam dapat meningkatkan luas permukaan material, yang pada gilirannya meningkatkan reaktivitas kimia. Partikel berukuran nano dengan morfologi tertentu, seperti bentuk kubus atau bintang, atau bahkan yang bermorfologi *bicontinuous concentric lamellar (bcl)* yang telah dikembangkan pada grup riset kami, dapat memiliki situs aktif yang lebih banyak dibandingkan dengan partikel berbentuk bulat pejal. Hal ini memungkinkan reaksi kimia terjadi lebih efisien, yang sangat penting dalam berbagai proses industri kimia seperti produksi *fine chemicals*, petrokimia, dan oleokimia. Selain itu, morfologi partikel yang unik dapat membantu dalam mengurangi penggunaan bahan katalis yang mahal, sehingga menurunkan biaya produksi.

Dalam bidang penyimpanan energi, keanekaragaman morfologi partikel dapat memengaruhi kapasitas dan efisiensi penyimpanan. Misalnya, dalam baterai lithium-ion, partikel nano dengan morfologi tertentu dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi dengan memungkinkan ion lithium bergerak lebih cepat dan efisien. Struktur partikel yang berpori atau berlapis-lapis dapat menyediakan jalur yang lebih mudah bagi ion untuk bergerak, sehingga meningkatkan kinerja baterai. Selain itu, morfologi partikel yang tepat dapat meningkatkan stabilitas material, mengurangi degradasi selama siklus pengisian (*charge*) dan pengosongan (*discharge*), yang pada akhirnya memperpanjang umur baterai.

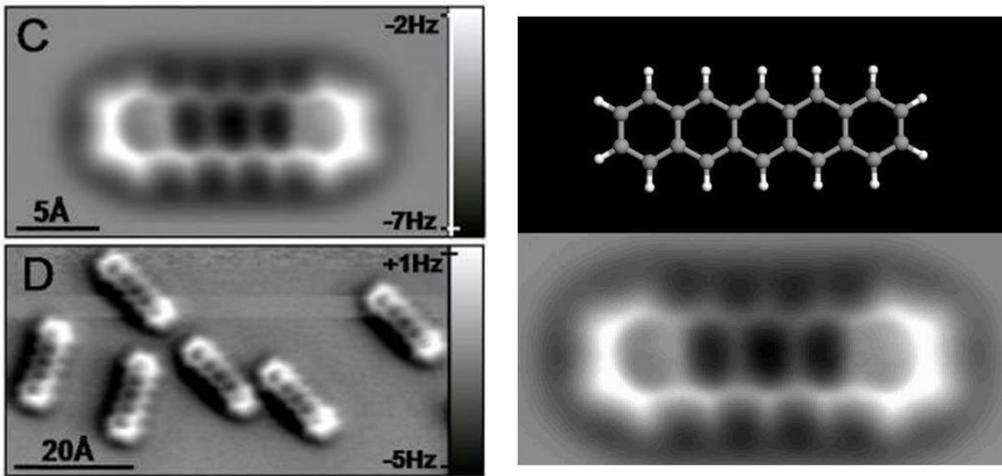
Dalam aplikasi sensor, keanekaragaman morfologi partikel dapat meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor. Partikel nano dengan morfologi tertentu dapat memiliki sifat optik atau elektronik yang unik, yang

dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan zat tertentu dengan akurasi tinggi. Misalnya, partikel nano berbentuk batang atau kawat dapat digunakan dalam sensor berbasis plasmonik untuk mendeteksi molekul gas atau cairan pada konsentrasi yang sangat rendah. Keanekaragaman morfologi ini memungkinkan pengembangan sensor yang lebih responsif dan dapat diandalkan untuk berbagai aplikasi, termasuk pemantauan lingkungan di lapangan dan diagnosis medis yang cepat.

Selain itu, keanekaragaman morfologi partikel juga membuka peluang baru dalam pengembangan material dengan sifat mekanik, optik, dan elektronik yang diinginkan. Misalnya, partikel nano dengan morfologi tertentu dapat digunakan untuk membuat material komposit dengan kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi. Dalam bidang optik, partikel nano dengan morfologi yang tepat dapat digunakan untuk mengontrol penyerapan dan pemantulan cahaya, yang penting dalam aplikasi seperti layar tampilan dan perangkat fotovoltaik. Dalam bidang elektronik, partikel nano dengan morfologi tertentu dapat digunakan untuk membuat perangkat dengan kinerja yang lebih tinggi dan konsumsi energi yang lebih rendah.

Secara keseluruhan, keanekaragaman struktur molekul dan morfologi partikel memainkan peran penting dalam pengembangan material maju. Dengan memahami struktur molekul dan morfologi yang tepat serta mampu melakukan kontrol terhadap morfologi partikel selama sintesis, para peneliti dapat merancang material dengan sifat yang diinginkan untuk berbagai aplikasi. Hal ini tidak hanya meningkatkan kinerja material, tetapi juga membuka peluang baru dalam teknologi dan industri, yang pada akhirnya dapat memberikan manfaat besar bagi masyarakat.

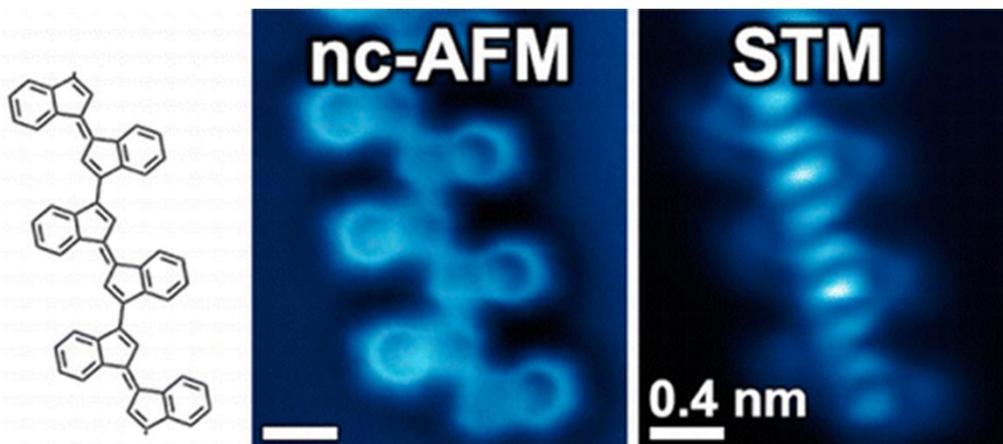
3 PERBEDAAN MIKROSKOPI DAN SPEKTROSKOPI



Gambar 2 Pencitraan AFM molekul pentasena (Gross dkk., 2009).

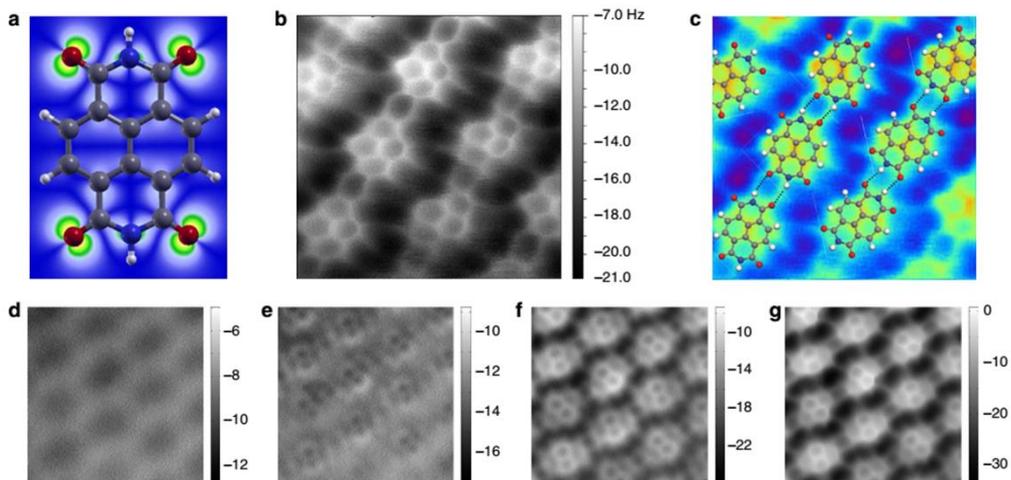
Dengan berkembangnya ilmu dan teknologi di bidang mikroskopi, para peneliti mulai dapat menerawang dunia molekuler *menggunakan atomic force microscopy (AFM)* dan *scanning tunneling microscopy (STM)*. Teknik AFM telah dapat merekam citra molekul pentasena dengan baik (Gambar 2) (Gross, dkk., 2009). Untuk rantai polimer terkonjugasi yang planar, kedua teknik ini telah dapat menghasilkan citra yang kurang lebih representatif dan sebanding (Gambar 3) (Riss, dkk., 2014). Dalam hal ini teknik AFM lebih lebih menggambarkan struktur molekul sedangkan STM lebih detail menggambarkan kerapatan elektron yang terdelokalisasi. Teknik AFM juga telah mampu merekam citra ikatan hidrogen di antara molekul-molekul yang berstruktur planar (Gambar 4) (Sweetman, dkk., 2014). Kedua teknik ini bahkan telah mampu merekam perubahan struktur molekul selama reaksi berlangsung (Gambar 5) (De Oteyza, dkk., 2013). Akan tetapi kedua teknik ini masih memiliki banyak keterbatasan, di mana pengamatan masih harus dilakukan pada kondisi yang terkontrol dengan baik (vakum, suhu rendah, bebas gangguan EM, ...), masih terbatas pada molekul berstruktur planar, dan pengamatan masih bersifat statis. Pengamatan dinamis masih dibatasi oleh kecepatan pemindaian dan besarnya gangguan yang dipakai untuk memulai proses reaksi. Biasanya dilakukan perbandingan statistik terhadap sejumlah citra hasil pemindaian sebelum dan sesudah gangguan. Kasus pada Gambar 5 diperoleh dengan cara memanaskan sampel dalam rentang waktu yang

singkat, kemudian didinginkan kembali, lalu melakukan statistik dari sejumlah citra hasil pemindaian.



Gambar 3 Kombinasi pengukuran spektroskopi nc-AFM dan STM pada rantai polimer terkonjugasi (Riss dkk., 2014).

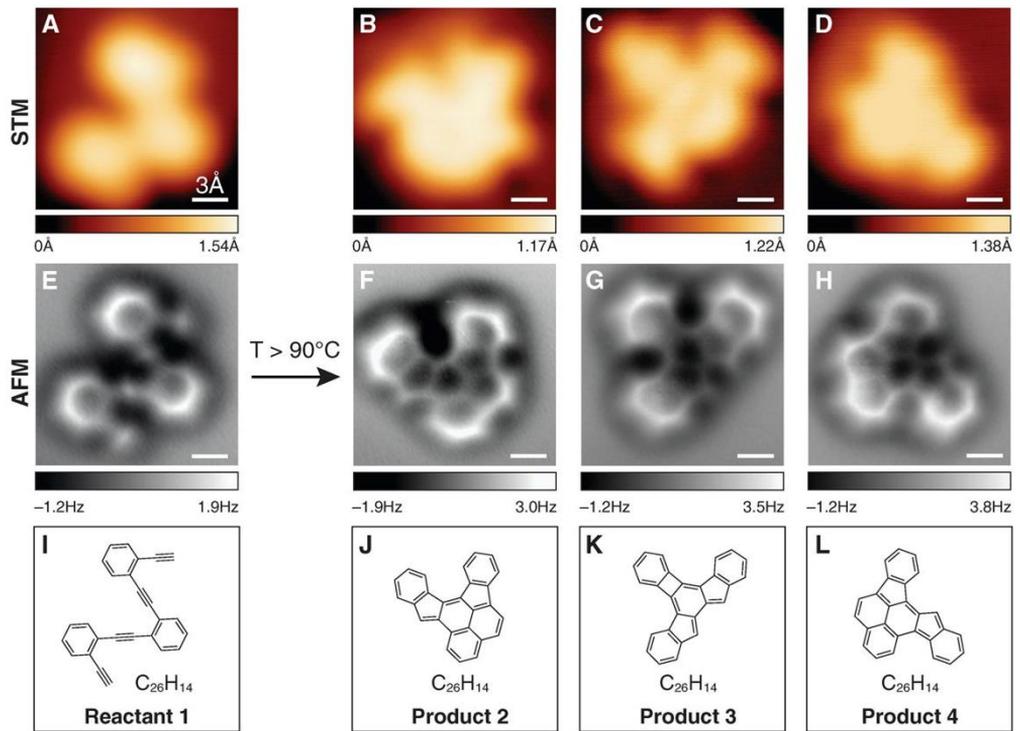
Secara umum mikroskopi merupakan teknik yang lebih disukai dibandingkan dengan berbagai teknik lain dalam karakterisasi material maju. Hal ini didukung oleh berbagai kemudahan dalam interpretasi data yang dihasilkan, yaitu berupa suatu citra, sekumpulan koordinat dengan nilai intensitas tertentu. Sebuah citra langsung dapat merepresentasikan benda yang diamati, mulai dari bentuk, ukuran, dan morfologi. Sedangkan pengukuran spektroskopi menghasilkan spektrum dari objek yang diamati. Semua informasi dari objek yang diamati, misalnya berupa struktur molekul, struktur elektronik, keberadaan defek, dll., masih tersimpan rapat di dalam spektrum tersebut. Serangkaian pengolahan data dan interpretasi harus dilakukan untuk mengekstrak informasi tersebut. Tidak hanya dibutuhkan beberapa alat bantu berupa perangkat lunak, tapi juga dibutuhkan pengetahuan yang cukup mengenai molekul atau material yang hendak ditelaah. Dengan kata lain, interpretasi dari suatu data spektroskopi menjadi suatu tantangan utama bagi para peneliti dalam menerawang ke dunia molekuler. Secara umum, perbedaan antara teknik mikroskopi dan spektroskopi tertabulasi pada Tabel 1.



Gambar 4 Kontras intermolekul dalam susunan ikatan hidrogen 2D (Sweetman, dkk., 2014).

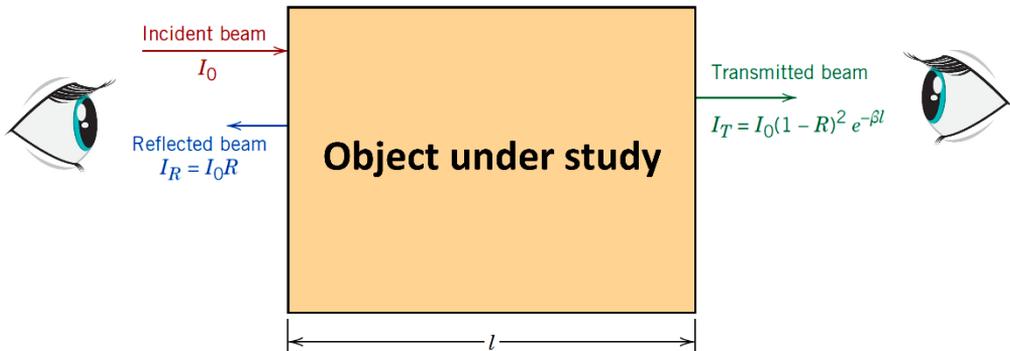
Tabel 1 Perbedaan antara teknik mikroskopi dan spektroskopi

Mikroskopi	Spektroskopi
Bertujuan untuk mengamati benda-benda yang tidak terlihat oleh mata telanjang.	Bertujuan mempelajari respons suatu benda terhadap cahaya.
Diperoleh citra atau koordinat dari benda yang diamati.	Diperoleh spektrum dari benda yang diamati. Hasil <i>mapping</i> dalam bentuk citra kadang dibutuhkan.
Interpretasi dapat dilakukan langsung terhadap citra yang diperoleh. Pada beberapa kasus pengolahan data mungkin dibutuhkan.	Interpretasi membutuhkan serangkaian pengolahan data. Pada beberapa kasus dibutuhkan pula sampel standar.
Umumnya bersifat lokal secara spasial.	Umumnya bersifat rata-rata secara spasial.
Dapat mengamati molekul dengan berbagai keterbatasan.	Mudah mengamati molekul termasuk sifat-sifat dinamik dari molekul.



Gambar 5 Perbandingan antara gambar STM, AFM, serta struktur molekul dari reaktan dan produk (De Oteya dkk., 2013).

4 INTERAKSI CAHAYA DAN MATERI

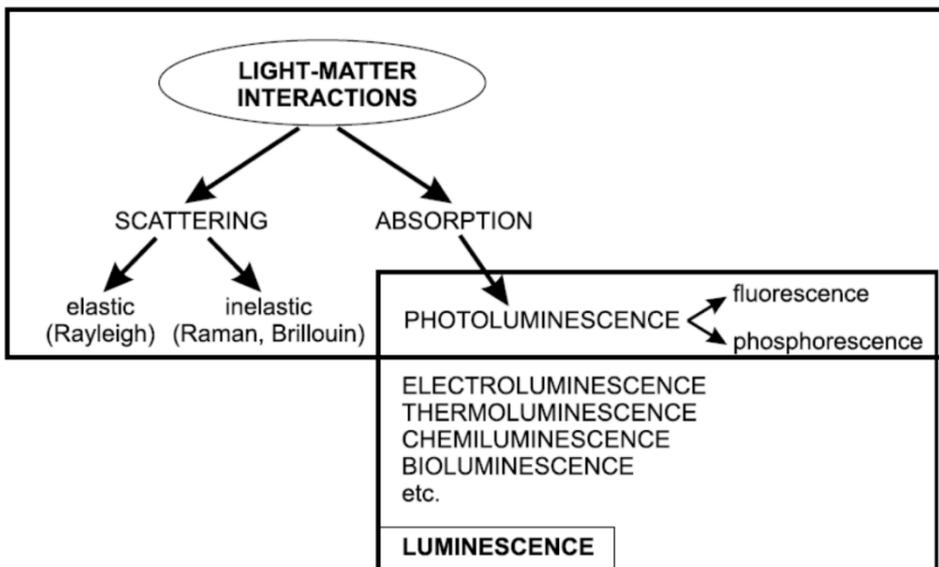


Gambar 6 Skema pengamatan optik untuk mempelajari sifat-sifat suatu benda melalui interaksinya dengan cahaya.

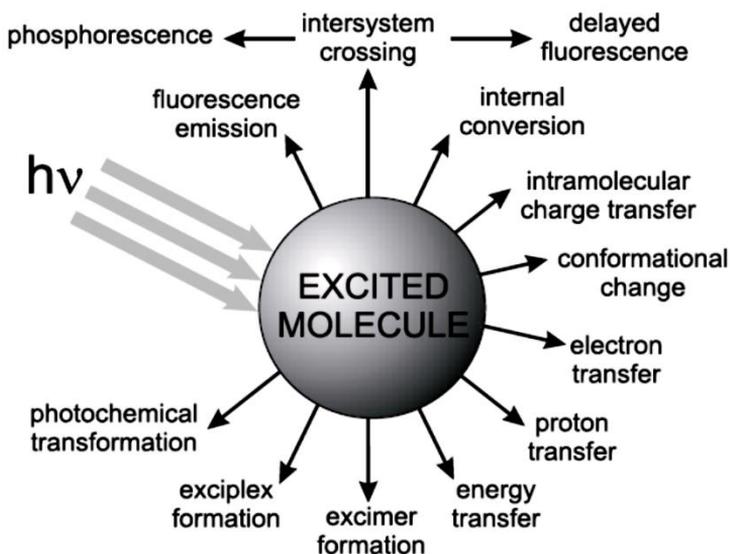
Sebelum kita masuk lebih jauh ke dalam spektroskopi molekul dan bagaimana teknik ini dapat digunakan dalam pengembangan material maju lewat pemahaman pada tingkat molekuler, sebaiknya kita memahami interaksi antara cahaya dan materi. Pada dasarnya semua teknik spektroskopi merupakan teknik perturbasi, di mana molekul yang hendak dipelajari (*molecule under study*) diganggu dengan seberkas cahaya atau foton. Gangguan cahaya pada molekul ini sering disebut sebagai interaksi antara cahaya dan molekul. Informasi mengenai interaksi ini masih terus dibawa oleh cahaya yang berinteraksi meskipun interaksi tersebut telah berlangsung. Hal ini menyebabkan peneliti dapat dipelajari interaksi yang terjadi termasuk informasi mengenai molekul tersebut, misalnya struktur molekul, struktur elektronik, dan keberadaan gugus fungsi.

Gambar 6 memperlihatkan secara skematis bagaimana peneliti sebagai pengamat dari luar dapat mempelajari sifat-sifat suatu benda lewat interaksinya dengan cahaya. Digambarkan bahwa cahaya yang datang pada *object under study* dapat mengalami pemantulan, penyerapan (absorpsi), dan diteruskan atau ditransmisikan. Secara sederhana interaksi cahaya dan molekul dapat dibagi menjadi 2, yaitu hamburan (*scattering*) dan absorpsi (*absorption*), yang masing-masing akan bertanggung jawab terhadap beberapa fenomena khas dan teknik spektroskopi terkait (Gambar 7) (Valeur, 2001). Jika suatu molekul mengalami absorpsi atau menyerap cahaya, maka molekul tersebut akan tereksitasi. Molekul yang tereksitasi dapat mengalami berbagai fenomena susulan seperti: emisi fluoresensi, konversi internal, transfer

muatan intramolekuler, perubahan konformasi, transfer elektron, transfer proton, transfer energi, pembentukan eksimer, pembentuk eksipleks, mengalami transformasi fotokimia, dan mengalami pembalikan spin atau yang dikenal sebagai *intersystem crossing* (Gambar 8) (Valeur, 2001). Fenomena pembalikan *spin* atau *intersystem crossing* akan menghasilkan emisi fosforesensi atau emisi fluoresensi tertunda.

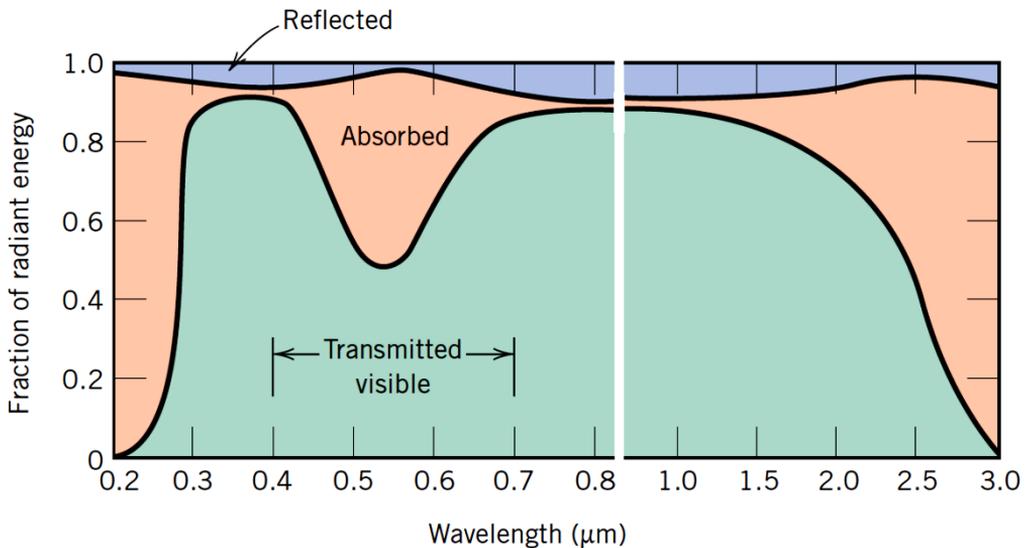


Gambar 7 Fenomena yang mungkin terjadi akibat Interaksi antara cahaya dengan materi (Valeur, 2001).



Gambar 8 Jalur de-eksitasi yang mungkin untuk molekul yang tereksitasi (Valeur, 2001).

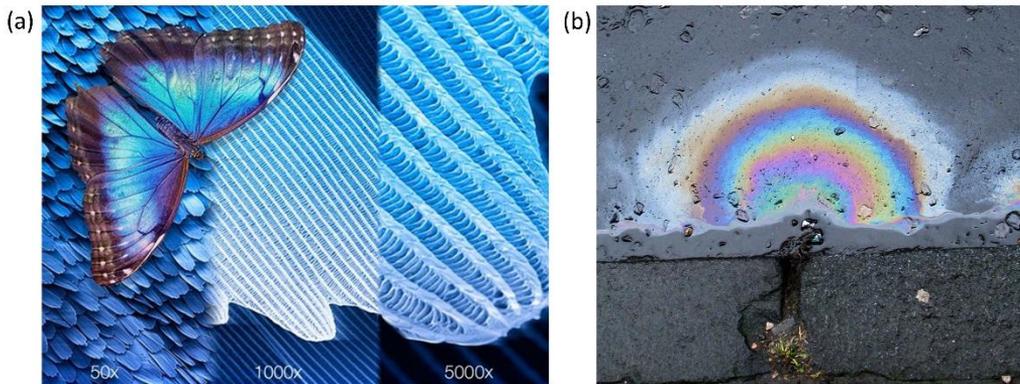
Salah satu fenomena terkait dengan interaksi antara cahaya dan materi yang mudah diamati sehari-hari adalah warna. Materi di sini memiliki arti luas yang meliputi molekul dan material maju yang dibahas dalam paparan ini. Warna terjadi karena interaksi antara cahaya dan materi melalui proses yang melibatkan penyerapan, pemantulan, dan transmisi cahaya. Cahaya putih terdiri atas berbagai panjang gelombang yang mewakili berbagai warna. Ketika cahaya mengenai suatu objek, beberapa panjang gelombang diserap oleh materi objek tersebut, sementara yang lain dipantulkan atau diteruskan. Warna yang kita lihat adalah hasil dari panjang gelombang cahaya yang dipantulkan atau diteruskan ke mata kita. Misalnya, daun hijau tampak hijau karena pigmen klorofil dalam daun menyerap sebagian besar panjang gelombang cahaya merah dan biru, tetapi memantulkan panjang gelombang hijau.



Gambar 9 Spektrum dari sebuah gelas berwarna hijau pada panjang gelombang yang berbeda (Western University, 2024).

Gambar 9 menunjukkan spektrum dari sebuah gelas berwarna hijau. Fraksi cahaya yang dipantulkan dan ditransmisikan yang memberikan kontribusi warna hijau pada rentang cahaya tampak (400–700 nm). Selain itu, struktur fisik materi juga dapat memengaruhi warna melalui fenomena seperti difraksi dan interferensi. Contohnya, sayap kupu-kupu dan bulu burung sering kali menunjukkan warna-warna cerah karena struktur mikroskopis mereka yang menyebabkan interferensi cahaya (Gambar 10a). Fenomena yang sama diamati sebagai warna pelangi pada lapisan minyak di

atas permukaan air (Gambar 10b). Secara umum fenomena ini disebut sebagai iridescensi yang disebabkan oleh interferensi cahaya pada struktur mikro (*microstructures*) atau film tipis (*thin films*). Oleh karena itu, warna yang kita lihat adalah kombinasi dari sifat kimia dan fisika dari materi serta interaksi kompleks antara cahaya dan objek tersebut. Fenomena ini menjelaskan mengapa objek yang sama dapat tampak berbeda warna di bawah kondisi pencahayaan yang berbeda atau ketika dilihat dari sudut yang berbeda.



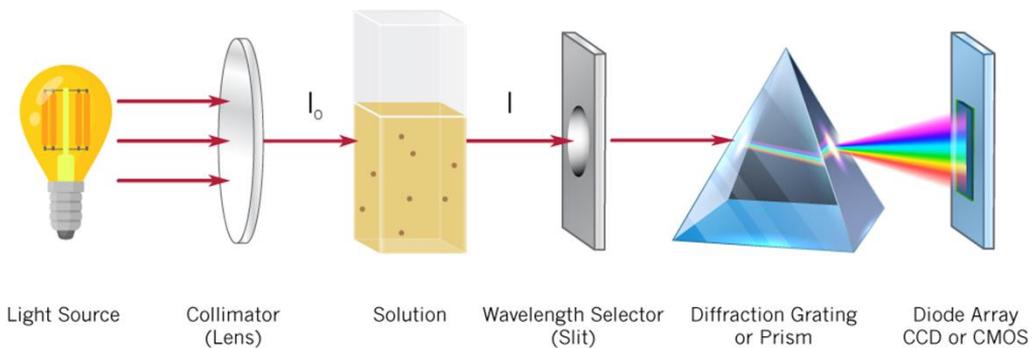
Gambar 10 (a) Sayap kupu-kupu di bawah mikroskop (*A butterflys wings under a microscope, t.t.*) dan (b) tumpahan minyak solar di jalan raya (John, 2007).

5 SPEKTROSKOPI OPTIS

Secara umum, spektroskopi optis menggunakan cahaya untuk mempelajari sifat material pada rentang UV C hingga inframerah dekat atau NIR (*near infrared*) dengan panjang gelombang berkisar antara 190–1000 nm. Pada beberapa kasus khusus, rentang NIR dapat diperluas hingga 2500 nm. Rentang 190–1000 nm sangatlah umum pada spektrometer modern karena didukung oleh detektor berbasis silikon yang berkinerja tinggi dan murah harganya. Detektor silikon modern dapat mendeteksi dengan baik pada rentang 190–1100 nm. Spektrometer yang dirancang untuk pengukuran lebih dari 1100 nm harus menggunakan detektor jenis lain yang jauh lebih mahal, misalnya detektor berbasis InGaAs.

Dengan menempatkan sampel pada konfigurasi optis transmisi atau reflektansi relatif terhadap sumber cahaya dan detektor, peneliti dapat menggunakan spektrometer optis untuk mengukur bagaimana cahaya berinteraksi dengan sampel. Spektrometer menghasilkan luaran berupa intensitas cahaya yang terukur oleh detektor sebagai fungsi panjang gelombang, yang kita kenal sebagai spektrum. Berdasarkan data yang berupa spektrum ini, peneliti dapat mengekstraksi berbagai informasi penting berkenaan dengan struktur elektronik dari material yang dipelajari.

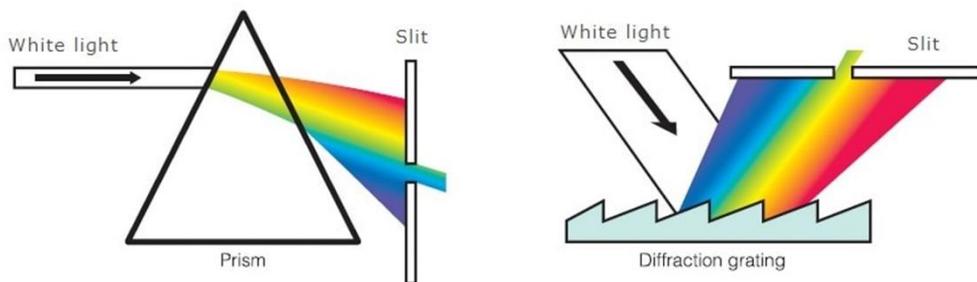
Polychromatic UV/Vis Spectrophotometer



Gambar 11 Skema pengaturan optik spektrofotometer UV-Vis (IMPLEN, 2024).

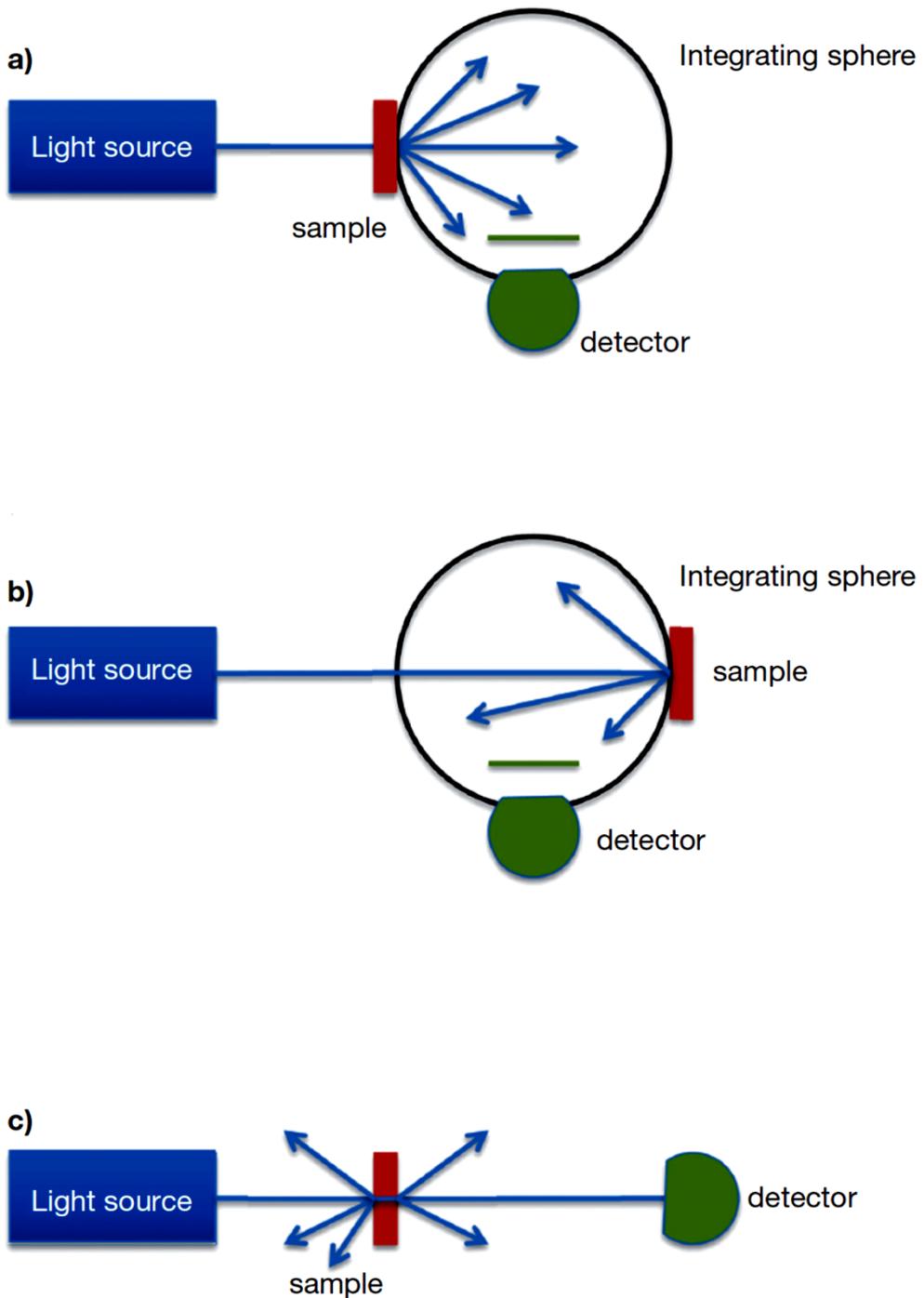
Pengaturan desain spektroskopi yang umum terdiri atas sumber cahaya, lensa, sampel yang biasanya ditempatkan pada pemegang sampel (*sample holder*) atau pemegang kuvet (*cuvette holder*), lensa, dan spektrometer. Gambar

11 secara skematis menggambarkan konfigurasi spektroskopi secara umum. Komponen-komponen ini dapat disusun secara langsung pada meja optis (*optical bench*)/pelat *beardboard* atau dihubungkan bersama menggunakan serat optis (*optical fiber*). Peneliti dapat menggunakan berbagai sumber cahaya dalam pengukuran spektroskopi optis, yang meliputi sumber cahaya monokromatik dan sumber cahaya polikromatik. Jenis pengukuran yang ingin dilakukan menentukan jenis sumber cahaya yang digunakan. Secara umum, sumber cahaya monokromatik digunakan untuk mengeksitasi material, misalnya, dalam pengukuran spektroskopi fluoresensi dan Raman dispersif, sedangkan sumber cahaya polikromatik digunakan untuk pengukuran spektroskopi absorpsi.



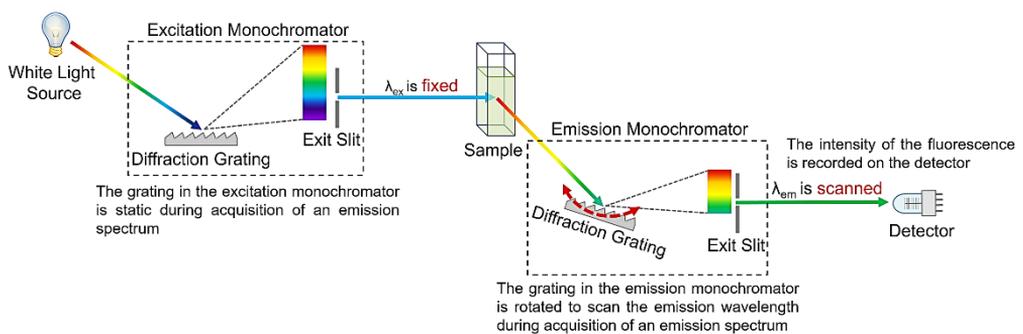
Gambar 12 Skema yang menggambarkan prinsip monokromator (Shimadzu, 2024).

Pada spektrometer optis, elemen optis dispersif, berupa prisma atau kisi difraksi akan mendispersikan cahaya yang masuk berdasarkan panjang gelombangnya (Gambar 12). Cahaya terdispersi yang mendekati berkas cahaya monokromatik ini kemudian diarahkan ke elemen penginderaan optik atau detektor, yang mengukur intensitas cahaya pada setiap panjang gelombang. Dengan menggunakan sumber cahaya yang terkalibrasi ke dalam spektrometer setelah melewati atau dipantulkan oleh suatu material, peneliti dapat mengukur bagaimana suatu material berinteraksi dengan cahaya.



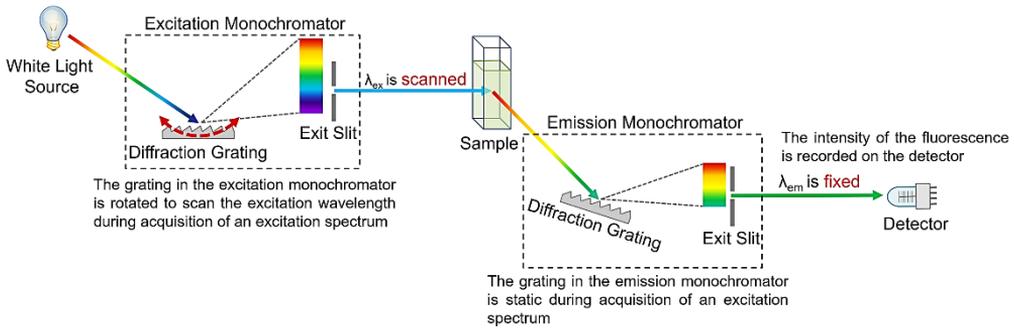
Gambar 13 Pengukuran spektroskopi absorpsi: (a) konfigurasi transmisi difus (*diffuse transmission*), (b) reflektansi difus (*diffuse reflectance*), dan (c) transmisi spekular (*specular transmission*) (Orea dan Merino, 2015).

Spektroskopi optis secara umum dapat dibagi menjadi dua teknik utama, yaitu spektroskopi absorpsi dan emisi. Pengukuran spektroskopi absorpsi pada bidang material maju umumnya menggunakan tiga konfigurasi utama, yaitu konfigurasi transmisi difus (*diffuse transmission*), reflektansi difus (*diffuse reflectance*), dan transmisi spekular (*specular transmission*) (Gambar 13) (Orera dan Merino, 2015). Konfigurasi transmisi difus umumnya digunakan untuk mengukur sampel yang berupa film tipis berpenampakan translusen (*translucent*). Untuk padatan yang tidak tembus pandang atau berpenampakan buram (*opaque*) biasanya diukur dengan menggunakan konfigurasi reflektansi difuse. Sedangkan untuk sampel yang berpenampakan transparan atau sampel berupa larutan dalam kuvet diukur dengan menggunakan konfigurasi transmisi spekular.



Gambar 14 Skema pengukuran spektrum emisi pada spektrofлуорометер (Edinburgh Instruments, 2024a).

Spektroskopi emisi yang dikenal juga sebagai spektroskopi fluoresensi atau luminesensi, memiliki dua mode pengukuran pada konfigurasi optik sama, yaitu mode pengukuran emisi dan eksitasi. Pada mode pengukuran emisi, panjang gelombang cahaya pengeksitasi dibuat tetap, sedangkan intensitas sinyal emisi atau fluoresensi/luminesensi diukur sebagai fungsi panjang gelombang (Gambar 14). Secara umum data yang dihasilkan disebut sebagai spektrum emisi atau spektrum fluoresensi/luminesensi. Sedangkan pada mode pengukuran eksitasi, panjang gelombang emisi dibuat tetap dan intensitas emisi diukur dengan memindai panjang gelombang pengeksitasi (Gambar 15). Spektrum yang dihasilkan disebut spektrum eksitasi yang merupakan spektrum pelengkap (*complementer*) dari spektrum absorpsi. Spektrum eksitasi menggambarkan spektrum absorpsi yang bertanggung jawab atau terlibat dalam proses rekombinasi radiatif.



Gambar 15 Skema pengukuran spektrum eksitasi pada spektrofлуorometer (Edinburgh Instruments, 2024a).

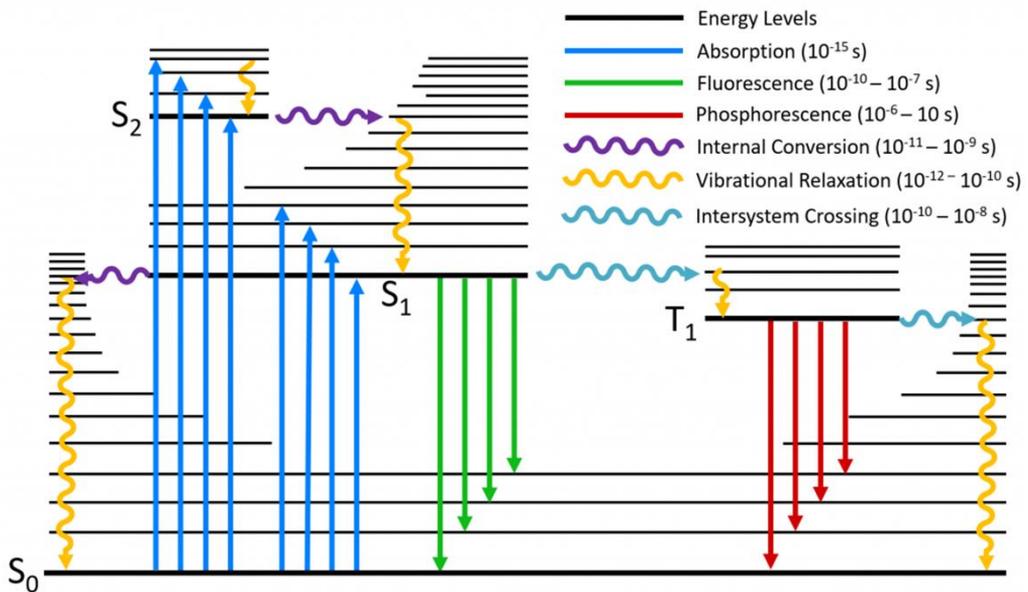
Spektroskopi absorpsi sering digunakan sebagai salah satu teknik karakterisasi yang bersifat kuantitatif. Dalam hal ini umumnya digunakan Hukum Bouger-Beer-Lambert, yang dapat ditulis secara sederhana menjadi Persamaan 5.1 sebagai berikut (Mayerhöfer dkk., 2020):

$$-\log \frac{I}{I_0} \approx A \approx \varepsilon b c \quad (5.1)$$

di mana I_0 adalah intensitas cahaya sebelum melewati sampel, I adalah intensitas cahaya setelah melewati sampel, A adalah absorbansi, ε adalah koefisien serapan molar, b adalah panjang jalan cahaya dalam cm, c adalah konsentrasi dalam molar (mol L^{-1}). Penentuan konsentrasi sampel biasanya dilakukan dengan membuat suatu kurva kalibrasi, yaitu suatu hubungan linear antara absorbansi terhadap konsentrasi suatu seri standar yang diketahui konsentrasinya. Konsentrasi sampel dapat diperoleh dengan membandingkan dengan absorbansinya terhadap kurva kalibrasi tersebut. Spektroskopi emisi atau fluoresensi/luminesensi juga dapat digunakan sebagai salah satu teknik karakterisasi yang bersifat kuantitatif pada sistem larutan. Kurva kalibrasi digunakan dengan analogi yang sama pada layaknya spektroskopi absorpsi.

Secara umum fenomena yang tercakup oleh teknik spektroskopi optis adalah diterangkan dengan menggunakan suatu diagram yang dikenal sebagai Diagram Perrin-Jablonski (Gambar 16) (Lakowicz, 2006). Pada awal mula diagram ini dikembangkan oleh fisikawan Polandia, Alexander Jablonski, yang kemudian dikenal sebagai bapak Spektroskopi fluoresensi sebagai penghormatan bagi kontribusinya pada bidang ini (Gambar 17a). Diagram ini kemudian dikembangkan dan disempurnakan oleh fisikawan Prancis, yaitu

Jean Baptist Perrin dan putranya Francis Perrin (Gambar 17b dan 17c), hingga dikenal sekarang sebagai Diagram Perrin-Jablonski (Berberan-Santos, 2001; Valeur dan Brochon, 2001). Jean Perrin memperkenalkan konsep transfer energi antara molekul dan mengembangkan sebuah teori yang menerangkan tentang fenomena fluoresensi yang tertunda akibat aktivasi termal. Sedangkan Francis Perrin mengembangkan banyak teori tentang fenomena fluoresensi yang mencakup pengembangan model *active sphere* pada proses *quenching*, hubungan antara *quantum yield* dan *lifetime* pada fenomena fluoresensi, dan teori fluoresensi terpolarisasi.



Gambar 16 Diagram Perrin-Jablonski (Berberan-Santos, 2001; Edinburgh Instruments, 2024b; Lakowicz, 2006; Valeur dan Brochon, 2001).

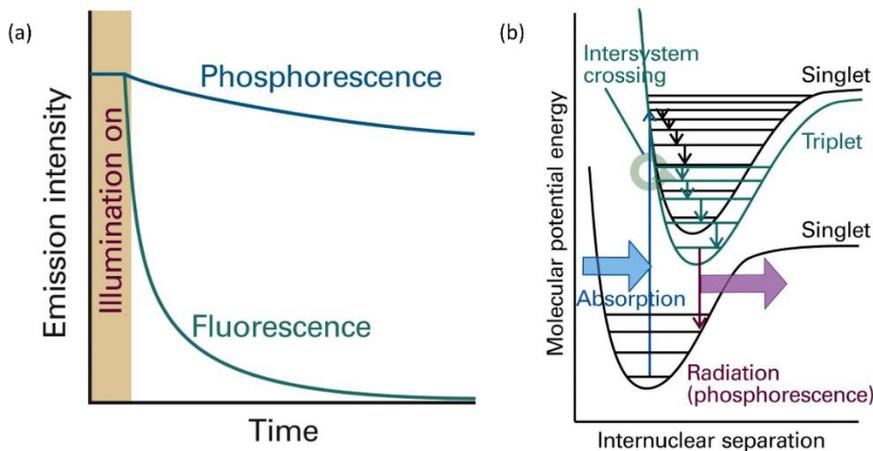


Gambar 17 (a) Aleksander Jabłoński (1898-1980), (b) Jean Baptiste Perrin (1870-1942), dan (c) Francis Perrin (1901-1992) (Berberan-Santos, 2001; Edinburgh Instruments, 2024b; Lakowicz, 2006; Valeur dan Brochon, 2001).

Diagram Perrin-Jablonski adalah suatu alat bantu yang sangat berguna dalam visualisasi transisi yang mungkin bagi suatu molekul setelah mengalami fotoeksitasi. Secara umum Diagram Perrin-Jablonski ditunjukkan pada Gambar 16, yang dapat digunakan untuk menggambarkan berbagai fenomena yang mencakup berbagai proses dasar dalam spektroskopi optis, yaitu absorpsi cahaya (fotoeksitasi), fluoresensi, fosforesensi, konversi internal, relaksasi vibrasional, dan pembalikan spin (*intersystem crossing*). Tingkat-tingkat energi dalam Diagram Perrin-Jablonski digambarkan sebagai garis horizontal berwarna hitam, dengan nilai energi meningkat dari bawah ke atas. Garis tebal melambangkan tingkat vibrasional terendah pada setiap keadaan elektronik, sedangkan garis tipis menggambar tingkat-tingkat vibrasi yang lebih tinggi. Penamaan keadaan atau tingkat energi elektronik didasarkan konfigurasi spin/momentum sudut spin (S) atau multiplisitas spin ($2S+1$) pada masing-masing keadaan. Keadaan singlet, dengan total momentum sudut spin sama bernilai sama dengan nol, dinyatakan dengan lambang " S_i ", sedangkan keadaan triplet, dengan total momentum sudut spin bernilai sama dengan satu, dinyatakan dengan lambang " T_i ". Notasi i akan bernilai 0 hingga n , di mana nilai 0 menyatakan keadaan elektronik dasar dari masing-masing konfigurasi spin atau multiplisitas spin. Sehingga S_0 , S_1 , dan T_1 masing-masing menyatakan keadaan dasar singlet, keadaan tereksitasi pertama singlet, dan keadaan tereksitasi pertama triplet, bagi molekul tersebut.

Pada Diagram Perrin-Jablonski, panah menyatakan berbagai transisi yang melibatkan pertukaran energi di antara berbagai keadaan atau tingkat energi (Gambar 16). Secara umum transisi-transisi ini dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu transisi radiatif dan non-radiatif. Transisi radiatif dinyatakan dengan panah lurus, sedangkan transisi non-radiatif dinyatakan dengan panah bergelombang. Proses absorpsi atau fotoeksitasi dari suatu molekul dalam keadaan dasar digambarkan dengan panah lurus vertikal mengarah ke atas berwarna biru, sedangkan proses fluoresensi dan fosforesensi masing-masing dinyatakan dengan panah lurus vertikal mengarah ke bawah berwarna hijau dan merah. Proses relaksasi vibrasional (*vibrational relaxation*), suatu transisi non-radiatif ke tingkat vibrasional lebih rendah pada tingkat elektronik yang sama, digambarkan sebagai panah bergelombang vertikal mengarah ke bawah berwarna kuning. Proses konversi internal (*internal conversion*), suatu transisi non-radiatif di antara dua tingkat elektronik yang memiliki

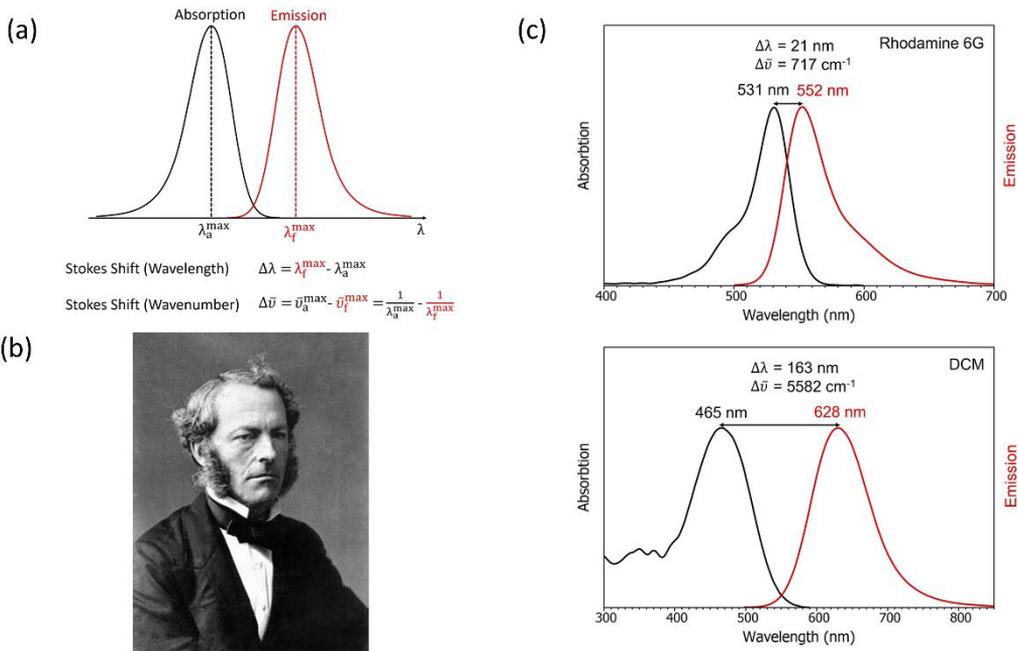
multiplisitas yang sama, digambarkan dengan panah bergelombang horizontal berwarna ungu. Gabungan kedua transisi non-radiatif ini tersebut sering disebut sebagai proses disipasi termal (*thermal dissipation*). Proses pembalikan spin (*intersystem crossing*), suatu transisi non-radiatif di antara dua tingkat vibrasional yang memiliki energi sama (*isoenergetic*) namun berada pada keadaan elektronik dengan multiplisitas spin yang berbeda, dinyatakan dengan panah bergelombang horizontal berwarna sian. Pada prinsipnya, transisi di antara dua keadaan elektronik yang berbeda multiplisitas spin adalah suatu transisi terlarang, di mana transisi ini melanggar aturan konservasi momentum sudut spin. Namun akibat adanya interaksi yang dikenal sebagai *spin-orbit coupling*, yaitu interaksi antara momentum sudut spin dan momentum sudut orbital, transisi terlarang ini dapat terjadi dengan probabilitas yang rendah.



Gambar 18 Perbedaan proses fluoresensi dan fosforesensi berdasarkan (a) *lifetime* emisi dan (b) transisi elektronik dengan multiplisitas spin yang berbeda (Atkins dan Paula, 2006).

Terdapat dua jenis transisi radiatif yang diilustrasikan dalam Diagram Perrin-Jablonski pada Gambar 16, yaitu proses fluoresensi dan fosforesensi. Proses Fluoresensi adalah suatu transisi radiatif di antara dua keadaan elektronik dengan multiplisitas spin yang sama, misalnya dari $S_1 \rightarrow S_0$, yang dinyatakan dengan garis lurus vertikal mengarah ke bawah berwarna hijau. Transisi ini pada umumnya berlangsung dengan sangat cepat, yaitu dengan *lifetime* antara 10^{-10} sampai 10^{-7} detik. Sedangkan proses fosforesensi adalah suatu transisi radiatif di antara dua keadaan elektronik dengan multiplisitas spin yang berbeda, misalnya dari $T_1 \rightarrow S_0$, yang dinyatakan dengan garis lurus vertikal mengarah ke bawah berwarna merah. Pada prinsipnya, transisi

fosforesensi adalah suatu transisi terlarang seperti layaknya proses pembalikan spin (*intersystem crossing*), yang menyebabkan transisi ini terjadi dengan sangat lambat pada rentang 10^{-6} sampai 10 detik, yang membedakan proses ini dengan transisi fluoresensi. Secara lebih sederhana Gambar 18 menggambarkan dengan lebih sederhana perbedaan antara proses fluoresensi dan fosforesensi berdasarkan (a) *lifetime* emisi dan (b) transisi elektronik dengan multiplisitas spin yang berbeda (Atkins dan Paula, 2006).



Gambar 19 (a) Geseran Stokes atau Stokes-shift (Valeur, 2001), (b) George Gabriel Stokes (1819-1903) (Stokes, 1852), dan (c) spektrum absorpsi dan fluoresensi bagi zat warna Rhodamine 6G dan (Dicyanomethylene)-2-methyl-6-(4-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM) (Edinburgh Instruments, 2024d).

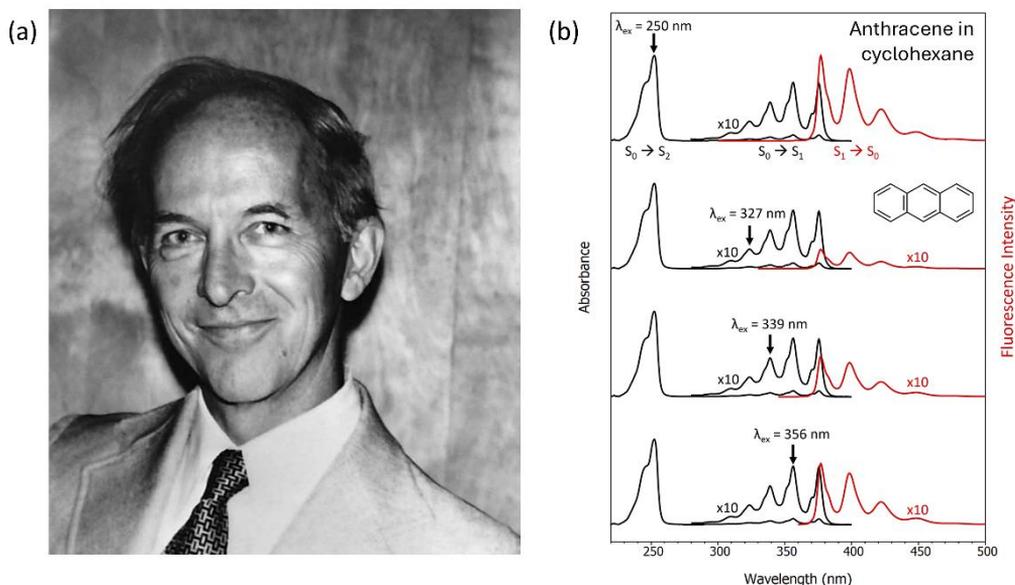
Secara umum kedua transisi radiatif ini dikenal sebagai fotoluminesensi. Pada kedua proses ini terjadi kehilangan energi yang cukup besar, di mana energi tersebut cukup untuk dikonversi menjadi foton atau cahaya pada rentang UV hingga inframerah dekat. Kehilangan energi ini bertanggung jawab pada fenomena yang kita kenal sebagai geseran Stokes (*Stokes-shift*) dan juga formulasi pada aturan Kasha. Pada transisi fluoresensi dan fosforesensi, selalu diamati emisi cahaya dengan panjang gelombang yang lebih panjang dari berkas cahaya pengeksitasi, atau dengan kata lain, emisi fluoresensi dan fosforesensi selalu memiliki energi yang lebih kecil dari berkas cahaya pengeksitasinya. Perbedaan panjang gelombang atau energi ini disebut

sebagai geseran Stokes atau Stokes-*shift* (Gambar 19a) (Valeur, 2001). Fenomena ini pertama kali diamati oleh Georges Gabriel Stokes pada tahun 1852 (Gambar 19b) (Stokes, 1852). Umumnya geseran Stokes dinyatakan sebagai perbedaan panjang gelombang $\Delta\lambda$ (Persamaan 5.2) atau perbedaan energi/frekuensi dalam bilangan gelombang $\Delta\tilde{\nu}$ (Persamaan 5.3) sebagai berikut:

$$\Delta\lambda = \lambda_f^{max} - \lambda_a^{max} \tag{5.2}$$

$$\Delta\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_a^{max} - \tilde{\nu}_f^{max} \tag{5.3}$$

Pada Gambar 19c menunjukkan spektrum absorpsi dan fluoresensi bagi zat warna atau *dye*, yaitu Rhodamine 6G dan (Dicyanomethylene)-2-methyl-6-(4-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM). Dipaparkan pula geseran Stokes untuk kedua definisi, yaitu perbedaan panjang gelombang dan perbedaan energi/frekuensi. Dalam penggunaan sehari-hari perbedaan panjang gelombang praktis untuk digunakan. Namun untuk suatu studi spektroskopi yang mendalam, umumnya dipakai geseran Stokes dalam perbedaan energi/frekuensi, karena lebih mudah diinterpretasi dan dibandingkan dengan pendekatan teoretis, seperti berbagai teknik spektroskopi komputasi menggunakan metode *ab initio*.



Gambar 20 (a) Michael Kasha (1920–2013) dan (b) molekul antrasena dalam sikloheksana yang dieksitasi pada berbagai tingkat elektronik dan vibrasional (Edinburgh Instruments, 2024c; Lewis dan Kasha, 1944).

Aturan Kasha dikembangkan oleh Michael Kasha pada tahun 1950 (Gambar 20a) yang menyatakan bahwa keadaan atau tingkat elektronik yang mengalami transisi radiatif atau mengemisikan cahaya adalah keadaan atau tingkat elektronik terendah pada multiplisitas spin tersebut (Lewis dan Kasha, 1944). Dengan kata lain, proses fluoresensi selalu berasal dari tingkat vibrasional dasar pada keadaan S_1 , sedangkan proses fosforesensi selalu berasal dari tingkat vibrasional dasar pada keadaan T_1 , terlepas dari keadaan awal tereksitasinya. Aturan Kasha adalah sebagai konsekuensi bahwa pada molekul tereksitasi, laju konversi internal dan relaksasi vibrasional dari tingkat elektronik yang lebih tinggi jauh lebih cepat dibandingkan dengan laju emisi menuju ke keadaan dasar elektronik. Fenomena ini dapat dengan mudah diterangkan menggunakan Diagram Perrin-Jablonski yang telah dibahas sebelumnya (Gambar 16). Secara eksperimental aturan ini telah terbukti kesahihannya, seperti yang digambarkan untuk molekul antrasena dalam sikloheksana yang dieksitasi pada berbagai tingkat elektronik dan vibrasional (Gambar 20b). Semua keadaan tereksitasi awal yang berbeda-beda itu semua memberikan spektrum emisi atau fluoresensi yang persis sama, yaitu dengan transisi $S_1 \rightarrow S_0$.

6 SPEKTROSKOPI VIBRASIONAL

Spektroskopi vibrasional mencakup beberapa teknik spektroskopi yang sangat penting, terutama spektroskopi absorpsi inframerah (IR) dan spektroskopi hamburan Raman. Kedua teknik ini mengamati gerak vibrasional karakteristik dari suatu molekul yang dikenal sebagai mode normal. Pengamatan gerak vibrasional ini dapat digunakan untuk mempelajari dan menjelaskan struktur molekul dari sisi simetrinya. Spektroskopi vibrasional adalah teknik spektroskopi struktural pertama yang banyak digunakan oleh ahli kimia organik, terutama dalam penentuan keberadaan gugus fungsi.

Spektroskopi absorpsi inframerah (IR) bekerja dengan mengukur absorpsi cahaya inframerah oleh molekul. Ketika molekul menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu, energi cahaya tersebut menyebabkan gerak vibrasi pada ikatan kimia dalam molekul. Setiap gugus fungsi dalam molekul memiliki frekuensi gerak vibrasi yang unik, sehingga spektrum IR dapat digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada dalam sampel. Teknik ini sangat berguna dalam analisis kualitatif dan kuantitatif, serta dalam studi struktur molekul.

Di sisi lain, spektroskopi hamburan Raman mengukur intensitas cahaya yang dihamburkan secara inelastis oleh molekul ketika terpapar oleh berkas cahaya monokromatik, misalnya laser. Proses ini melibatkan interaksi antara cahaya dan gerak vibrasi molekul, yang menghasilkan perubahan pada frekuensi cahaya yang dihamburkan. Perubahan ini memberikan informasi tentang mode vibrasi molekul dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur molekul. Spektroskopi Raman sangat berguna dalam analisis material yang sulit diukur dengan teknik lain, seperti sampel dalam larutan atau pada permukaan.

Molecule			
Mode of vibration			
Variation of polarizability with normal coordinate (schematic)			
Polarizability derivative at equilibrium position	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Raman activity	Yes	No	No
Variation of dipole moment with normal coordinate (schematic)			
Dipole moment derivative at equilibrium position	$= 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
Infrared activity	No	Yes	Yes

Gambar 21 Tiga gerak vibrasi dasar dari molekul linear triatomik, yang diwakili oleh molekul CO_2 (Long, 2002).

Spektroskopi hamburan Raman dan absorpsi inframerah adalah dua teknik yang saling melengkapi dan biasanya keduanya dibutuhkan untuk mengamati mode vibrasi molekul secara lengkap. Meskipun beberapa mode vibrasi mungkin aktif dalam kedua teknik ini, sinyal yang diamati pada spektroskopi Raman dan IR muncul dari proses yang berbeda dan memiliki aturan seleksi yang berbeda. Secara umum, spektroskopi Raman paling baik mengamati mode vibrasi simetris dari kelompok molekul non-polar, sedangkan spektroskopi IR paling baik mengamati mode vibrasi asimetris dari kelompok molekul polar. Secara fundamental yang membedakan bagaimana suatu molekul akan aktif Raman atau aktif IR adalah struktur molekul dan jenis mode vibrasinya. Suatu molekul akan aktif IR jika strukturnya dalam suatu gerak vibrasi molekul tersebut akan mengalami perubahan momen dipol, yang dilambangkan dengan μ dan secara matematik dapat dituliskan menjadi Persamaan 6.1 sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial\mu}{\partial Q}\right)_0 \neq 0 \tag{6.1}$$

Sedangkan suatu molekul akan aktif Raman jika dalam gerak vibrasinya molekul tersebut akan mengalami perubahan kebolehpolaran (*polarizability*) yang dilambangkan sebagai α dan secara matematik dapat dituliskan menjadi Persamaan 6.2 sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0 \neq 0 \tag{6.2}$$

Untuk memudahkan pengertian bagaimana struktur dan gerak mode vibrasi dasar (*normal mode*) dapat aktif IR dan Raman, struktur linier dari molekul karbon dioksida (CO₂) dan struktur non-liner berbentuk huruf “V” dari molekul air (H₂O) umumnya digunakan sebagai contoh. Gambar 21 memaparkan tiga gerak vibrasi dasar dari molekul linear triatomik, yang biasanya diwakili oleh molekul CO₂. Diperlihatkan bahwa pada mode gerak vibrasional regang simetris (*symmetrical stretching*), molekul hanya mengalami perubahan kebolehpolaran (*polarizability*), tetapi tidak mengalami perubahan momen dipol, sehingga mode vibrasi ini hanya aktif Raman. Sedangkan untuk mode gerak vibrasional regang asimetris (*asymmetrical stretching*) dan tekuk (*bending*), keduanya hanya mengalami perubahan momen dipol, tetapi tidak mengalami perubahan kebolehpolaran, sehingga mode vibrasi ini hanya aktif

IR(Long, 2002). Dengan perlakuan yang sama, Gambar 22 menunjukkan bagaimana suatu molekul non-linear triatomik yang diwakili oleh molekul air mengalami gerak vibrasional dasar atau mode normal. Diperlihatkan bahwa semua mode gerak vibrasional dasar (*normal modes*), yaitu regang simetris, tekuk, dan regang asimetris, mengalami perubahan kebolehpolaran sekaligus momen dipol, sehingga semua mode vibrasi ini bersifat aktif Raman dan IR (Long, 2002). Teknik hamburan Raman dan absorpsi inframerah sering disebut sebagai dua teknik yang komplementer karena memberikan informasi yang saling melengkapi, menghasilkan gambaran lengkap mengenai mode vibrasi dan struktur suatu molekul.

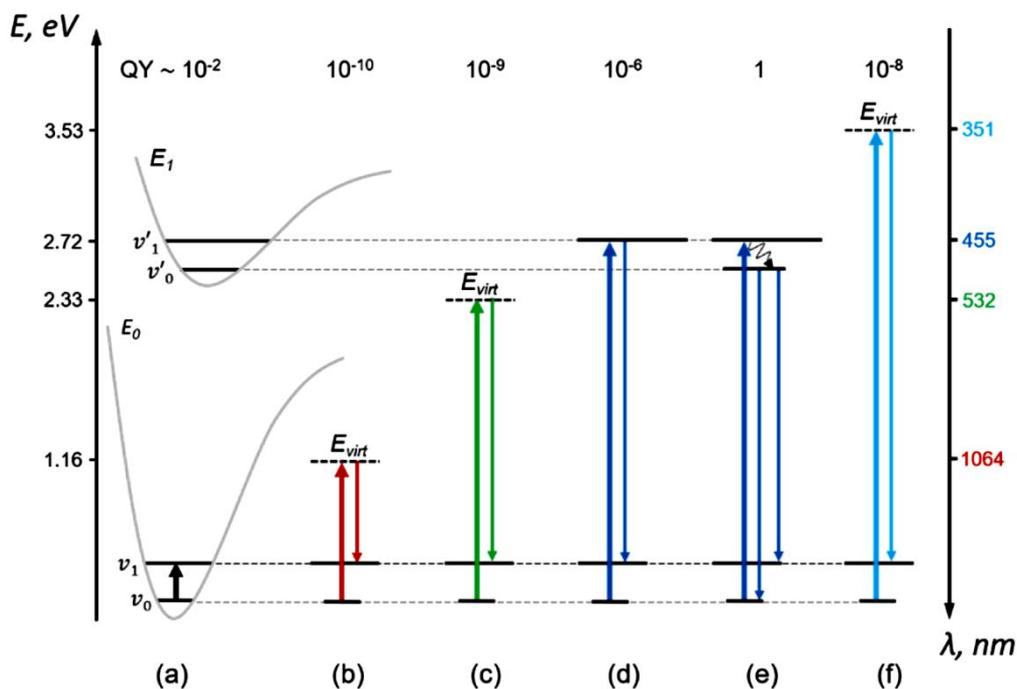
Keunggulan utama dari spektroskopi vibrasional adalah fleksibilitasnya dalam mempelajari berbagai jenis sampel. Baik itu cairan, larutan, pasta, bubuk, film, serat, gas, atau permukaan, semua dapat dianalisis dengan memilih teknik pengambilan sampel yang tepat. Perkembangan instrumen yang lebih canggih telah memungkinkan pengembangan teknik-teknik sensitif baru yang dapat memeriksa sampel yang sebelumnya sulit ditangani. Hal ini membuka peluang baru dalam penelitian dan aplikasi praktis, memungkinkan para ilmuwan untuk mengeksplorasi dan memahami materi dengan cara yang lebih mendalam dan akurat. Keunggulan dan kekurangan dari teknik spektroskopi hamburan Raman dan absorpsi inframerah yang mencakup preparasi sampel, jenis sampel, rentang frekuensi dalam analisis, dan aplikasi karakteristik terdistribusi pada Tabel 2.

Molecule			
Mode of vibration			
Variation of polarizability with normal coordinate (schematic)			
Polarizability derivative at equilibrium position	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
Raman activity	Yes	Yes	Yes
Variation of dipole moment with normal coordinate (schematic)			
Dipole moment derivative at equilibrium position	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
Infrared activity	Yes	Yes	Yes

Gambar 22 Gerak vibrasional dasar atau mode normal dari suatu molekul non-linear triatomik yang diwakilkan oleh molekul air (Long, 2002).

Tabel 2 Perbandingan teknik spektroskopi hamburan Raman dan absorpsi inframerah (Larkin, 2011).

	Hamburan Raman	Absorpsi Inframerah
Kemudahan dalam preparasi sampel	Sangat mudah	Bervariasi
Cairan	Sangat mudah	Sangat mudah
Serbuk	Sangat mudah	Mudah
Polimer	Sangat mudah	Mudah
Gas	Mudah	Sangat mudah
Identifikasi mode vibrasi sidik jari (<i>fingerprinting</i>)	Sangat baik	Sangat baik
Vibrasi yang sesuai	Simetrik	Asimetrik
Identifikasi gugus fungsi (<i>group frequencies</i>)	Baik sekali (<i>excellent</i>)	Baik sekali (<i>excellent</i>)
Pengukuran pada sistem larutan air	Sangat baik (<i>very good</i>)	Sangat sulit (<i>very difficult</i>)
Analisis Kuantitatif	Baik	Baik
Identifikasi mode-mode vibrasi pada frekuensi rendah	Baik sekali (<i>excellent</i>)	Sulit (<i>difficult</i>)



Gambar 23 Transisi di antara tingkat-tingkat energi vibrasional pada suatu molekul diatomik dalam bentuk Diagram Perrin-Jablonski yang disederhanakan. Energi foton yang digunakan untuk mengeksitasi molekul tersebut meningkat dari kiri ke kanan, beserta perkiraan perolehan kuantum (*quantum yield*) dari masing-masing proses: (a) absorpsi inframerah, (b) hamburan Raman pada daerah near inframerah (NIR-Raman), (c) hamburan Raman pada daerah sinar tampak (Vis-Raman), (d) hamburan Raman resonansi, (e) fluoresensi, (f) hamburan Raman pada daerah UV (UV-Raman) (Rzhevskii, 2021).

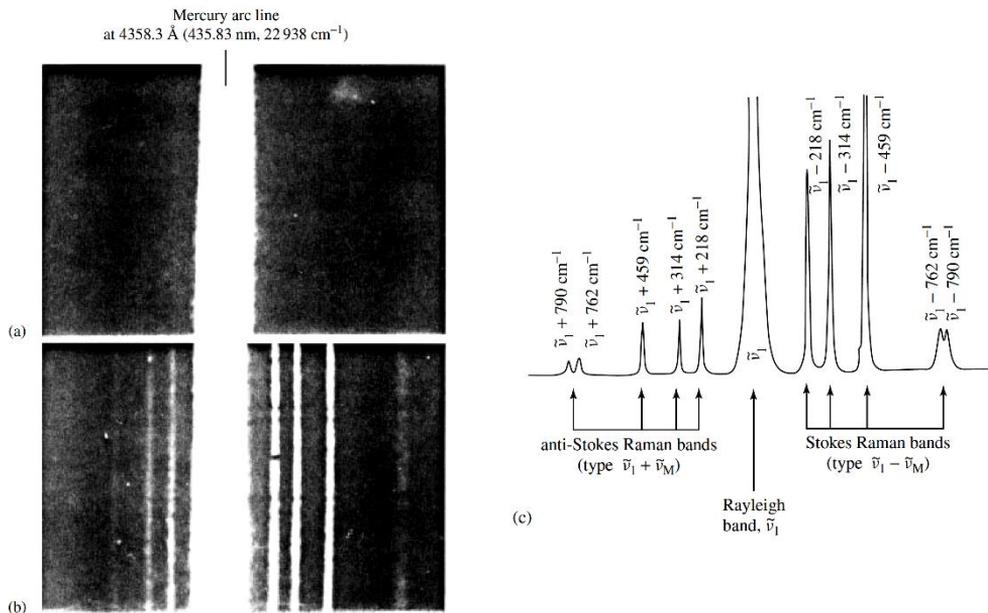
Untuk memahami lebih dalam fenomena yang terlibat pada spektroskopi vibrasional, Diagram Perrin-Jablonski yang telah dibahas pada bagian spektroskopi optis dapat digunakan. Gambar 23 menggambarkan berbagai transisi di antara tingkat-tingkat energi vibrasional pada suatu molekul diatomik dalam bentuk Diagram Perrin-Jablonski yang disederhanakan (Rzhevskii, 2021). Energi foton yang digunakan untuk mengeksitasi molekul tersebut meningkat dari kiri ke kanan, dari rentang inframerah ke UV, yang menghasilkan berbagai proses sebagai berikut: (a) absorpsi inframerah, (b) hamburan Raman pada daerah near inframerah (NIR-Raman), (c) hamburan Raman pada daerah sinar tampak (Vis-Raman), (d) hamburan Raman resonansi, (e) fluoresensi, (f) hamburan Raman pada daerah UV (UV-Raman). Perolehan kuantum (*quantum yield*) pada proses absorpsi inframerah jauh lebih besar dari proses hamburan Raman, yang berbeda 4 hingga 6 orde lebih rendah. Perolehan kuantum proses hamburan Raman cenderung meningkat dengan meningkatnya energi pengekstiasi. Perolehan kuantum terbesar dicapai pada proses hamburan Raman yang dibantu oleh fenomena resonansi, di mana energi laser yang digunakan beresonansi dengan perbedaan tingkat elektronik pada molekul tersebut ($h\nu_{ri}$). Perolehan kuantum bagi proses fluoresensi digunakan sebagai referensi atau acuan dengan nilai satu ($10^0 = 1$).



Gambar 24 (a) C. V. Raman mendemonstrasikan alat spektrograf yang digunakan dalam mengamati proses hamburan Raman (Indiatimes, 2021), (b) spektrograf yang digunakan C. V. Raman dan K. S. Krishnan dalam mengamati hamburan Raman, (c) spektrum garis pada plat foto yang menggambarkan hamburan Raman (Raman dan Krishnan, 1928).

Sebelum kita masuk pada diskusi yang lebih mendalam mengenai proses hamburan Raman, ada baiknya kita menengok ke belakang ke sejarah penemuan fenomena ini. Fenomena hamburan Raman diamati oleh Fisikawan India, C. V. Raman pada tahun 1922. Hasil penemuan ini dilaporkan

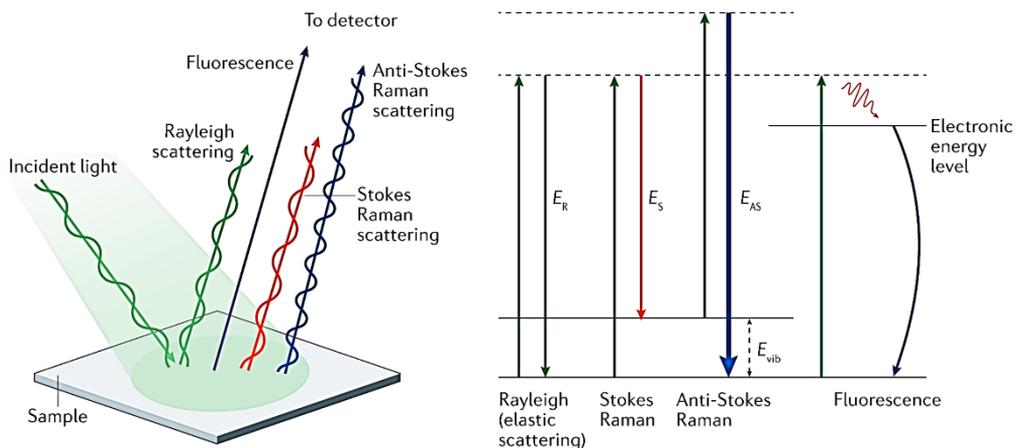
6 tahun kemudian bersama rekannya K. S. Krishnan, dalam sebuah artikel pada majalah ilmiah *Nature* yang berjudul “*The Negative Absorption of Radiation*”, yang dipublikasikan pada tahun 1928 (Raman dan Krishnan, 1928). Gambar 24 menunjukkan alat spektrograf bersejarah yang digunakan oleh digunakan C. V. Raman dan K. S. Krishnan dalam mengamati hamburan Raman dalam bentuk spektrum garis pada permukaan sebuah plat foto.



Gambar 25 Detail spektrum garis yang diamati oleh C. V. Raman dan K. S. Krishnan menggunakan spektrograf yang mereka rancang (Gambar 24b), di mana (a) hanya cahaya pengeksitasi dan (b) dengan keberadaan sampel. (c) Plot dari spektrum garis pada (b) menggambarkan dari kiri ke kanan hamburan anti-Stokes, Rayleigh, dan Stokes (Long, 2002).

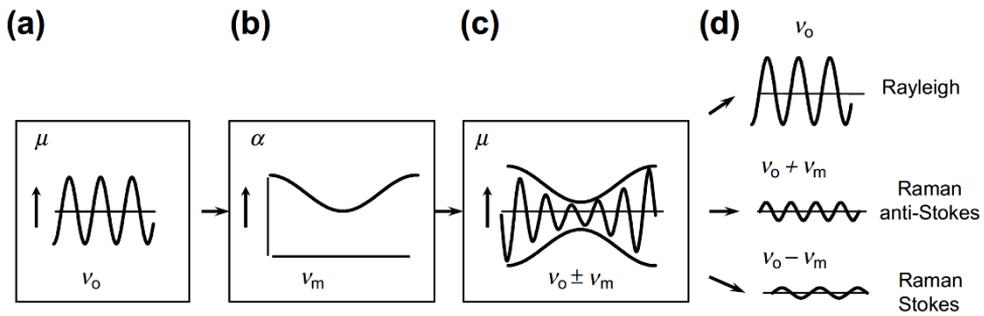
Secara detail spektrum garis yang diamati oleh C. V. Raman dan K. S. Krishnan dipaparkan pada Gambar 25 (Long, 2002). Garis terang pada tengah spektrum garis menggambarkan hamburan Rayleigh, sedangkan garis-garis halus pada kiri dan kanan garis terang tersebut menggambarkan masing-masing hamburan anti-Stokes dan Stokes. Proses hamburan cahaya oleh suatu molekul yang menghasilkan hamburan elastis (Rayleigh) dan hamburan inelastic (Raman Stokes dan Raman anti-Stokes) sering diterangkan menggunakan diagram energi yang mirip dengan Diagram Perrin-Jablonski (Gambar 26) (Mosca dkk., 2021). Proses yang digambarkan pada diagram ini tidak hanya melibatkan tingkat-tingkat energi vibrasional dan elektronik akan tetapi juga melibatkan apa yang disebut sebagai keadaan-keadaan virtual (*virtual states*). Keadaan virtual ini bukanlah tingkat energi elektronik,

melainkan suatu terminologi yang digunakan untuk menggambarkan keadaan antara (*intermediate state*) yang dihasilkan dalam suatu proses Raman (Williams dan Imre, 1988). Berdasarkan diagram ini tingkat vibrasional dapat berinteraksi dengan foton pengeksitasi lewat keadaan-keadaan virtual ini. Interaksi tersebut dapat berupa proses absorpsi dan emisi, yang masing-masing menghasilkan hamburan Stokes dan anti-Stokes. Model gelombang juga dikembangkan untuk menerangkan proses hamburan Raman.



Gambar 26 Skematis proses hamburan cahaya oleh molekul yang menghasilkan dua jenis hamburan yaitu: hamburan elastis (Rayleigh) dan inelastis (Raman). Hamburan Raman sendiri dibagi menjadi hamburan Stokes dan anti-Stokes, di mana Stokes memiliki energi yang lebih rendah dari energi cahaya pengeksitasi, sedangkan hamburan anti Stokes memiliki energi yang lebih tinggi. Proses fluoresensi yang melalui proses absorpsi juga dipaparkan sebagai pembandingan (Mosca, dkk., 2021).

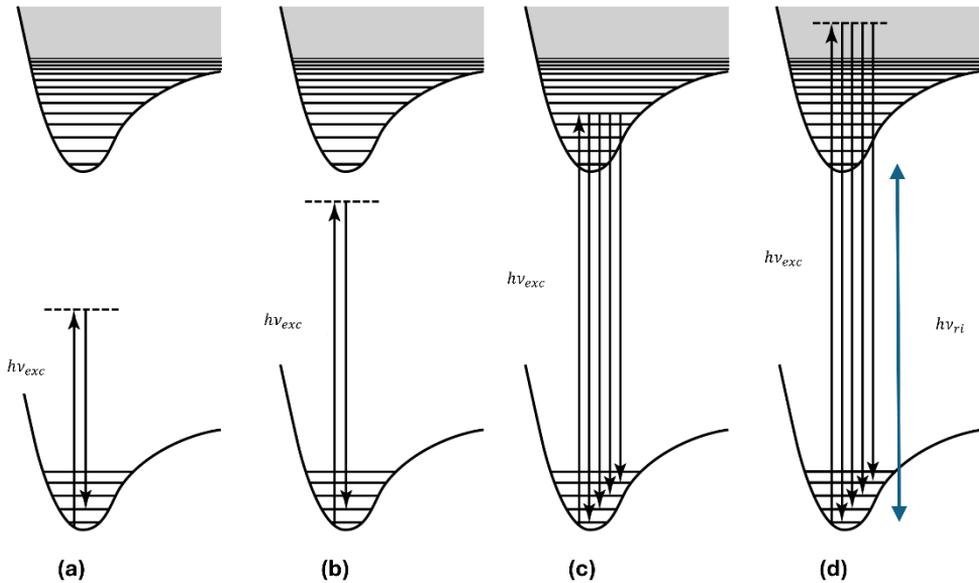
Gambar 27 memaparkan bagaimana dalam model gelombang sebuah foton pengeksitasi yang datang pada suatu molekul dengan frekuensi ν_0 (a) akan berinteraksi dengan gerak vibrasi molekul dengan frekuensi ν_m (b) menghasilkan suatu osilasi momen dipol elektronik yang termodulasi amplitudo vibrasional (c). Setelah interaksi tersebut molekul akan mengemisikan foton yang diamati sebagai hamburan foton dengan 3 frekuensi yang berbeda, yaitu ν_0 , $\nu_0 + \nu_m$, dan $\nu_0 - \nu_m$, yang masing-masing dikenal sebagai hamburan Rayleigh, Raman anti-Stokes, dan Raman Stokes (Gambar 27d) (Larkin, 2011). Dalam aplikasinya sebagai suatu metode karakterisasi material, teknik hamburan Raman umumnya hanya akan mengamati hamburan Raman Stokes saja, sedangkan hamburan Raman anti-Stokes jarang digunakan dalam karakterisasi material.



Gambar 27 Skematis proses hamburan cahaya oleh molekul menggunakan model gelombang: (a) Radiasi foton yang datang menginduksi momen dipol dari molekul agar berosilasi pada frekuensi foton tersebut, (b) vibrasi molekul yang dapat mengubah kebolehpolaran (*polarizability*), yang akan mengubah amplitudo dari osilasi momen dipol molekul, (c) osilasi momen dipol yang termodulasi amplitudo, dan (d) komponen yang berosilasi dan beramplitudo tetap dalam molekul yang dapat mengemisikan radiasi gelombang elektromagnetik (Larkin, 2011).

Berdasarkan besarnya energi foton pengekspitasinya ($h\nu_{exc}$) terhadap perbedaan tingkat elektronik atau energi resonansi pada molekul tersebut ($h\nu_{ri}$) proses hamburan Raman dapat dibagi menjadi 4 kategori. Proses hamburan Raman disebut sebagai proses hamburan Raman biasa (*normal Raman scattering*) jika nilai $h\nu_{exc} \ll h\nu_{ri}$ (Gambar 28a). Proses ini adalah proses hamburan Raman yang paling umum digunakan dalam karakterisasi material menggunakan teknik spektroskopi Raman. Rendahnya energi pengekspitasi yang digunakan menjadikan teknik karakterisasi ini suatu metode karakterisasi yang tidak merusak (*non-destructive*) yang mampu memberikan informasi struktural dari material tanpa mengganggu struktur yang sedang diamati. Kelemahan dari metode ini adalah rendahnya sinyal yang Raman yang diamati, sebagaimana yang telah dibahas sebelumnya, perolehan kuantum pada proses hamburan Raman cenderung meningkat dengan energi foton pengekspitasi. Proses hamburan Raman disebut sebagai hamburan Raman pre-resonansi (*pre-resonance Raman scattering*) jika nilai $h\nu_{exc}$ mendekati nilai $h\nu_{ri}$ atau $h\nu_{exc} \rightarrow h\nu_{ri}$ (Gambar 28b). Proses ini cukup marak dikembangkan sebagai teknik karakterisasi material dalam upaya meningkatkan intensitas Raman, biasanya digunakan intensitas pengekspitasi yang rendah dan waktu pengukuran yang singkat, agar material yang diamati tidak rusak akibat berkas laser yang digunakan. Proses hamburan Raman disebut sebagai proses hamburan Raman resonansi (*resonance Raman scattering*) jika nilai $h\nu_{exc} \approx h\nu_{ri}$ yang menghasilkan resonansi diskrit

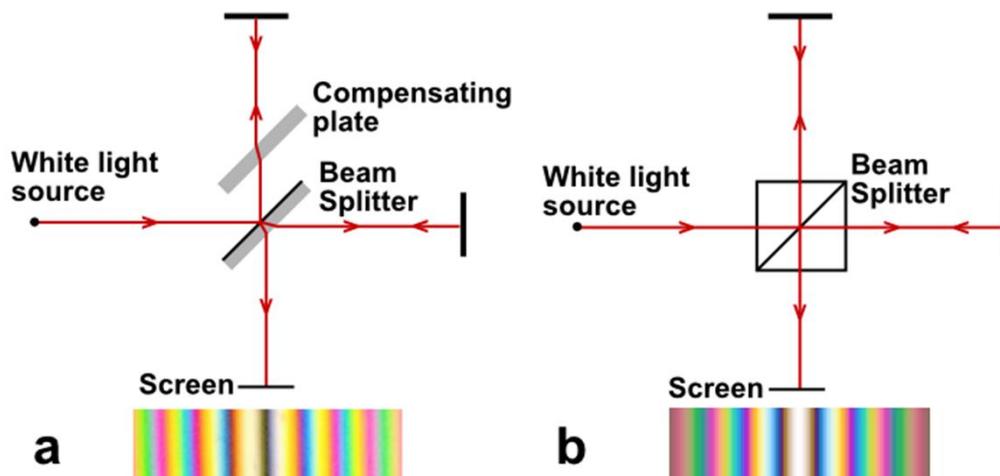
(Gambar 28c), atau $h\nu_{exc} \geq h\nu_{ri}$ pada rentang kontinum disosiatif yang menghasilkan resonansi kontinum (Gambar 28d) (Long, 2002).



Gambar 28 Proses hamburan Raman yang biasa terjadi pada sistem molekuler: (a) hamburan Raman biasa (*normal Raman scattering*), (b) hamburan Raman pre-resonansi (*pre-resonance Raman scattering*), (c) hamburan Raman resonansi diskrit (*discrete resonance Raman scattering*), dan (d) hamburan Raman resonansi kontinum (*continuum resonance Raman scattering*) (Long, 2002).

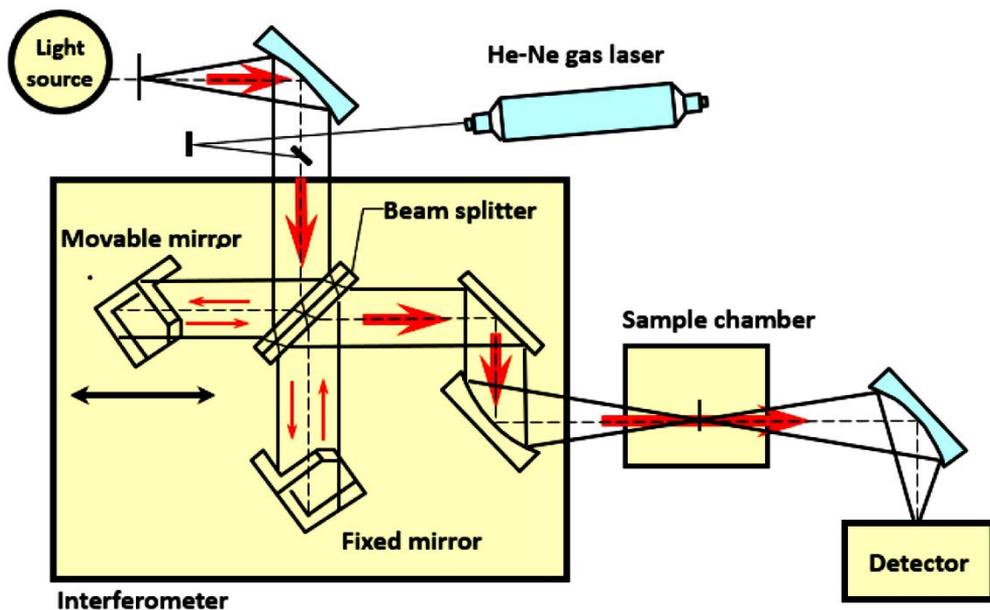
Dari sisi instrumentasi, suatu spektrometer inframerah modern memiliki desain yang sangat berbeda dibandingkan dengan spektrometer optis pada umumnya. Desain spektrometer inframerah modern yang sering disebut sebagai spektrometer FT-IR (*Fourier Transform infrared*) tidak menggunakan kisi difraksi ataupun prisma dalam mendispersikan cahaya, melainkan menggunakan perangkat yang disebut sebagai interferometer, khususnya interferometer Michelson. Interferometer Michelson mampu selayaknya prisma atau kisi difraksi dalam mendispersikan cahaya putih berdasarkan panjang gelombangnya (Gambar 29). Cahaya putih yang didispersikan akan terlihat sebagai warna pelangi pada layar. Dua jenis pemisah cahaya (*beam splitter*) dapat digunakan dalam menyusun suatu interferometer Michelson, dapat berupa plat (Gambar 29a) yang membutuhkan plat pengkompensasi (*compensating plate*) dan kubus (Gambar 29b). Plat pengkompensasi dibutuhkan agar panjang lintasan sinar transmisi dan refleksi menjadi sama panjang. Dalam aplikasinya interferometer Michelson membutuhkan cahaya dengan panjang koherensi (*coherence length*) yang cukup, hal ini menyebabkan

perangkat ini lebih populer digunakan pada rentang inframerah dibandingkan pada rentang cahaya tampak.



Gambar 29 Interferometer Michelson dengan menggunakan pemisah cahaya (*beam splitter*) berupa (a) plat (*plate*) dan (b) kubus (*cube*) dapat mendispersikan cahaya putih berdasarkan panjang gelombangnya yang teramati sebagai warna pelangi pada layar (aurantiaca, 2012).

Secara sederhana dan skematis, desain spektrometer FT-IR dipaparkan pada Gambar 30, yang terdiri atas sumber cahaya inframerah, laser He-Ne (merah), interferometer Michelson, wadah sampel, dan detektor (Yusuf, 2023). Berkas cahaya inframerah yang tidak koheren dan tidak terkolimasi akan melewati suatu celah sempit (*slit*) dan cermin cekung paraboloid (*paraboloid concave mirror*) agar menjadi koheren dan terkolimasi sebelum masuk ke dalam interferometer. Sebagai penanda (*reference*) digunakan berkas sinar monokromatik yang koheren dan terkolimasi, yaitu berupa berkas laser berwarna merah dari laser gas He-Ne. Berkas cahaya yang keluar dari interferometer akan melewati wadah sampel lalu difokuskan menuju detektor dengan sebuah cermin cekung paraboloid. Dalam aplikasi spektroskopi inframerah, semua cermin yang digunakan dilapisi dengan logam emas (Au) agar memiliki reflektansi yang optimum pada rentang inframerah. Gambar 31 memaparkan desain meja optis (*optical bench*) yang lebih realistis menggunakan komponen optis yang sesungguhnya, ukuran komponen optis dalam gambar merepresentasikan perbandingan ukuran yang sesungguhnya pada spektrometer FT-IR pada umumnya.

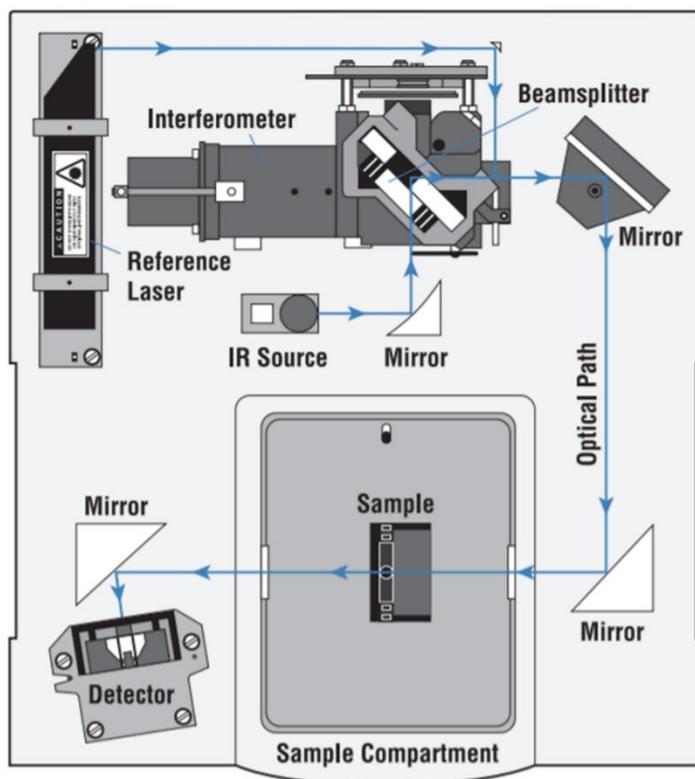


Gambar 30 Skematis desain alat spektrometer *Fourier Transform Infrared* atau FT-IR yang terdiri atas sumber cahaya (*light source*) inframerah, laser He-Ne (merah), interferometer (*interferometer Michelson*), wadah sampel (*sample chamber*), dan detektor (*detector*) (Yusuf, 2023).

Prinsip penggunaan alat spektrometer inframerah memiliki analogi yang cukup mirip dengan spektrometer pada spektroskopi absorpsi optis pada umumnya. Di mana intensitas berkas sinar yang diterima oleh detektor dalam keadaan wadah sampel berisi sampel (I) akan dibandingkan dengan intensitas ketika wadah sampel kosong (I_0). Seperti layaknya spektroskopi absorpsi pada umumnya, berdasarkan kedua nilai intensitas ini dapat diperoleh nilai absorbansi (A):

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad (6.3)$$

Akan tetapi dalam konstruksi spektrum pada spektrometer yang menggunakan interferometer sebagai perangkat pendispersi terdapat perbedaan yang cukup kontras jika dibandingkan dengan spektroskopi absorpsi pada umumnya yang menggunakan kisi difraksi atau prisma.



Gambar 31 Desain meja optis (*optical bench*) untuk alat spektrometer *Fourier Transform Infrared* atau FT-IR (Arulmozhi, 2007).

Pada spektrometer FT-IR, sinyal yang diterima oleh detektor bukan merupakan data spektrum, melainkan berupa data interferogram, yaitu suatu kumpulan data intensitas cahaya yang diterima oleh detektor sebagai fungsi dari posisi cermin pada interferometer. Agar spektrum dapat diperoleh, suatu perhitungan matematis, yaitu transformasi Fourier harus dilakukan terhadap interferogram yang diperoleh. Transformasi matematis ini biasanya dilakukan dengan metode transformasi Fourier cepat atau *fast fourier transform* (FFT). Agar diperoleh suatu spektrum absorpsi, prosedur yang dilakukan adalah dengan melakukan transformasi Fourier terhadap interferogram yang diperoleh baik ketika wadah sampel dalam keadaan kosong, maupun ketika berisi sampel. Prosedur konstruksi spektrum absorpsi pada spektroskopi FT-IR dipaparkan secara sederhana pada Gambar 32. Konstruksi spektrum diawali dengan transformasi Fourier terhadap masing-masing interferogram ketika wadah sampel kosong (*background*) dan berisi sampel (*sample*). Hasil transformasi Fourier dari kedua interferogram tersebut akan menghasilkan

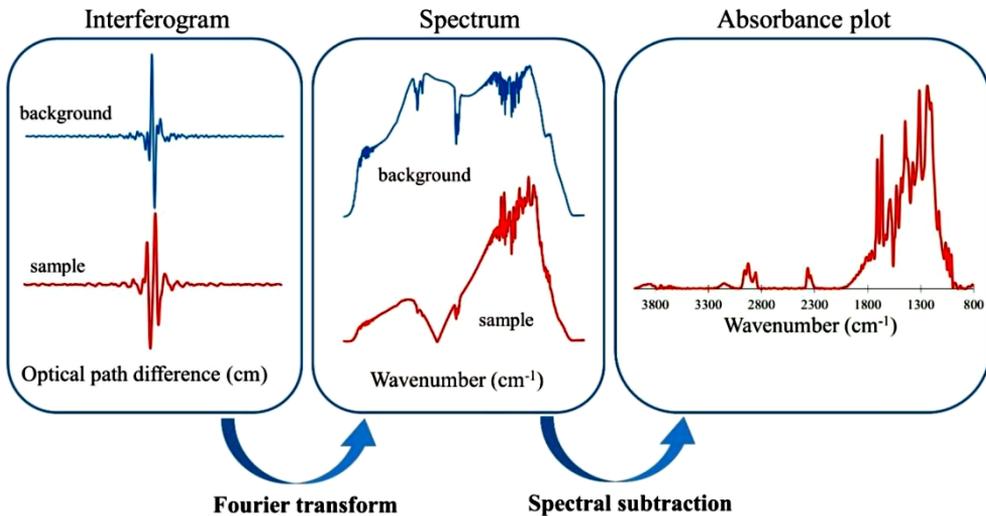
spektrum *background* dan *sample*. Spektrum *background* dan *sample* sebagai fungsi bilangan gelombang dapat dituliskan secara sederhana sebagai berikut:

$$I_0 = f(\tilde{\nu}) \quad (6.4)$$

$$I = f(\tilde{\nu}) \quad (6.5)$$

Untuk memperoleh spektrum absorpsi, Persamaan 6.3 dapat digunakan untuk melakukan substraksi terhadap kedua spektrum hasil transformasi Fourier, yaitu spektrum *background* pada Persamaan 6.4 dan *sample* pada Persamaan 6.5. Hasil substraksi yang diperoleh adalah spektrum absorpsi inframerah yang diinginkan yang dapat diwakilkan oleh Persamaan 6.6.

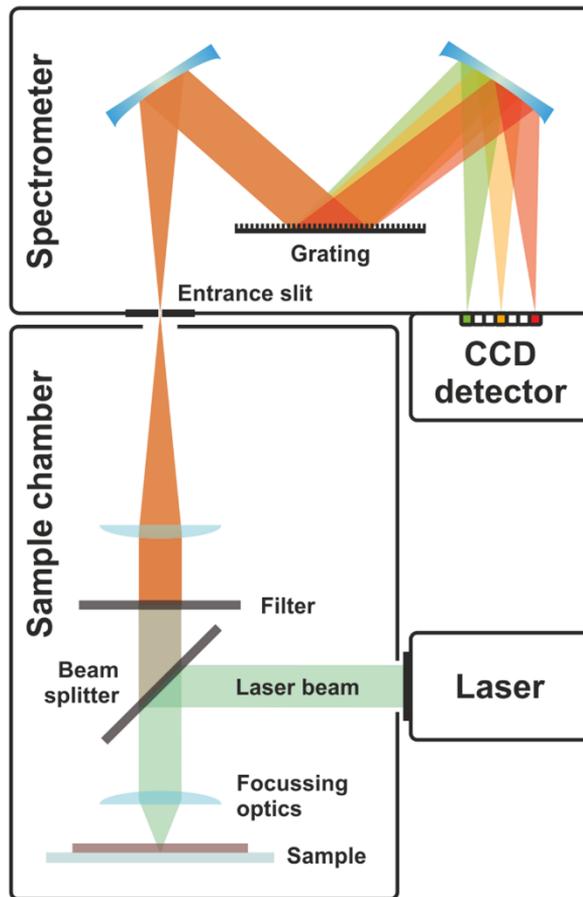
$$A(\tilde{\nu}) = -\log \frac{I(\tilde{\nu})}{I_0(\tilde{\nu})} \quad (6.6)$$



Gambar 32 Prosedur konstruksi spektrum absorpsi pada spektroskopi FT-IR. Konstruksi spektrum awali dengan transformasi Fourier terhadap masing-masing interferogram ketika wadah sampel kosong (*background*) dan berisi sampel (*sample*). Hasil transformasi Fourier dari kedua interferogram tersebut akan menghasilkan spektrum *background* dan *sample*. Hasil substraksi dari kedua spektrum tersebut menggunakan Persamaan 6.3 akan menghasilkan spektrum absorbansi yang diinginkan (Jafari, 2017).

Pada sisi yang lain, desain spektrometer yang umum digunakan dalam spektroskopi Raman untuk pengembangan material maju, yaitu spektroskopi Raman dispersif, sangatlah mirip dengan desain spektrometer pada spektroskopi optis, yaitu teknik spektroskopi emisi. Secara skematis desain optis spektrometer Raman dispersif dipaparkan pada Gambar 33 (Schmid dan Dariz, 2019). Spektrometer Raman dispersif terdiri atas sumber cahaya

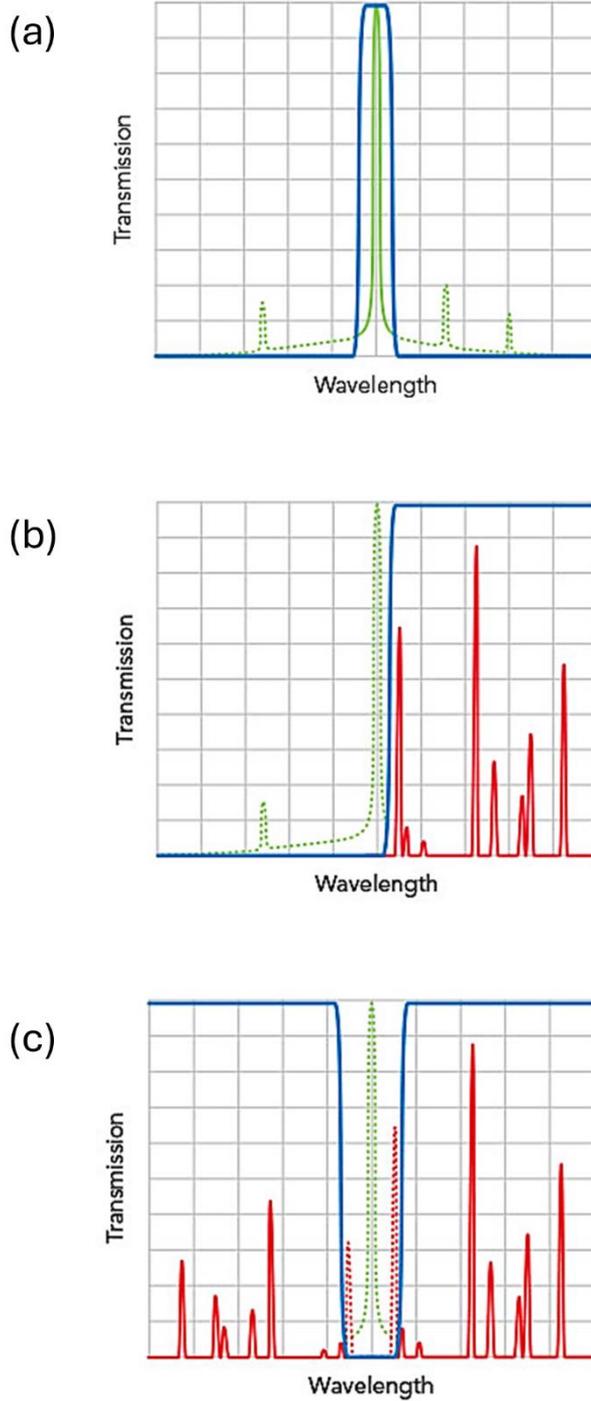
pengeksitasi, dalam hal ini berupa laser; sistem optis pemfokus, yang dapat digantikan dengan mikroskop pada *setup microRaman*; wadah sampel; filter Raman, yang membedakan dengan desain spektromter emisi pada umumnya; spektrometer; dan detektor, umumnya berupa kamera CCD (*charge-coupled device*).



Gambar 33 Skematis desain alat spektrometer Raman dispersif (Schmid dan Dariz, 2019).

Laser dan filter Raman merupakan dua komponen utama yang membedakan desain spektrometer Raman dibandingkan dengan spektrometer emisi pada umumnya. Penemuan laser pada tahun 1960 pula yang membuat teknik spektroskopi Raman menjadi populer dan marak digunakan (Long, 2002). Laser yang umum digunakan pada rentang cahaya tampak hingga batas inframerah dekat adalah: laser diode – 455 nm, laser *diode-pumped solid state* (DPSS) – 488 nm, laser Nd-YAG DPSS – 532 nm, laser He-Ne – 632.8 nm, laser diode – 650 nm, dan laser diode – 785 nm. Terdapat

tiga jenis filter Raman, yaitu filter garis laser (*laser-line filter*), filter lolos gelombang panjang (*long-wave pass filter*) atau filter tepi (*edge filter*), dan filter takik (*notch filter*). Filter jenis pertama, filter garis laser (*laser-line filter*), berguna untuk membersihkan berkas laser yang digunakan sebagai sumber cahaya pengeksitasi dari berkas parasit dengan panjang gelombang selain yang diinginkan. Filter ini menghalangi cahaya dengan semua panjang gelombang kecuali pada panjang gelombang laser itu sendiri (Gambar 34a). Filter ini ditempatkan tepat di depan laser sebelum masuk ke dalam sistem optis. Pada beberapa laser berkualitas tinggi, filter ini telah terpasang dalam modul laser sebagai kelengkapan bawaan dari fabrikasi laser. Filter jenis kedua, filter lolos gelombang panjang (*long-wave pass filter*) atau filter tepi (*edge filter*), merupakan filter Raman yang paling umum digunakan dalam spektrometer Raman. Filter ini sangat populer karena kinerjanya yang baik, memiliki usia yang panjang, dan harganya yang relatif murah. Menggunakan filter ini, hanya hamburan Raman Stokes yang dapat diamati, di mana filter ini akan menghalangi cahaya dengan panjang gelombang yang sama dengan laser (hamburan Rayleigh) dan yang lebih pendek (hamburan anti-Stokes). Hanya cahaya dengan panjang gelombang yang lebih panjang dari panjang gelombang laser pengeksitasi (hamburan Stokes) yang akan teruskan (Gambar 34b). Filter jenis terakhir adalah filter takik (*notch filter*), filter ini memungkinkan kita mengamati baik hamburan Raman Stokes maupun anti-Stokes. Secara prinsip, filter ini hanya akan menghalangi cahaya dengan panjang gelombang sama dengan laser pengeksitasi, atau hamburan Rayleigh (Gambar 34c). Filter jenis ini sangat sulit untuk difabrikasi dan membutuhkan biaya yang tinggi. Teknik fabrikasi filter interferensi pada umumnya yang menggunakan material dielektrik multi-lapisan tidak cukup untuk menghasilkan filter takik dengan kualitas yang baik. Umumnya gabungan filter interferensi dan absorpsi menjadi solusi dalam fabrikasi filter jenis ini. Adanya komponen material pengabsorpsi yang mudah rusak dalam penyinaran jangka panjang di bawah laser berintensitas tinggi, menjadikan usia dari filter jenis ini cukup singkat. Penggunaan filter takik terbatas pada aplikasi yang memang membutuhkan pengamatan hamburan anti-Stokes, pada kebutuhan umum, jenis filter tepi menjadi pilihan yang utama.

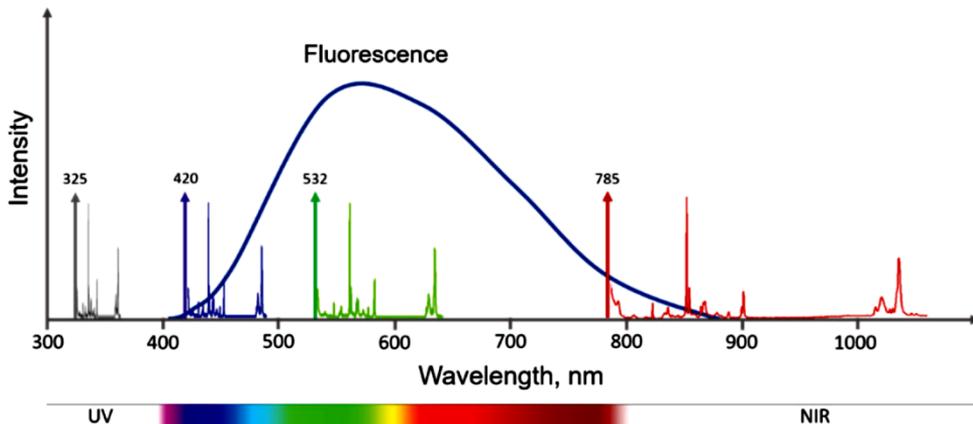


Gambar 34 Spektrum transmisi dari ketiga jenis filter Raman, (a) filter garis laser (*laser-line filter*), (b) filter lolos gelombang panjang (*long-wave pass filter*) atau filter tepi (*edge filter*), dan (c) filter takik (*notch filter*) (IDEX Health & Science, 2020).

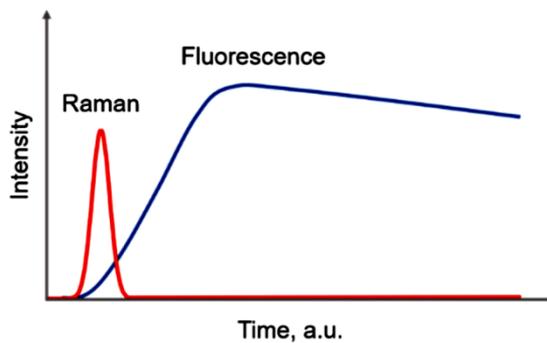
Fleksibilitas dalam pemilihan laser pengeksitasi dan pasangan filter yang sesuai menjadi suatu faktor yang sangat penting dalam desain spektrometer Raman. Perlu diingat bahwa tidak semua sampel, terutama dalam aplikasi material maju yang luas dapat dicakup oleh satu jenis laser saja. Kendala utama dalam pengukuran menggunakan teknik spektroskopi hamburan Raman adalah rendahnya intensitas hamburan Raman dan gangguan dari fenomena lain, misalnya emisi fluoresensi. Seperti telah dibahas sebelumnya bahwa fenomena hamburan Raman dan emisi fluoresensi dapat dideteksi secara bersamaan pada sampel yang sama dengan menggunakan perangkat spektrometer yang sama pula. Hal yang menjadi masalah adalah perolehan kuantum dari proses emisi fluoresensi jauh lebih besar dari proses hamburan Raman, bahkan masih jauh lebih besar ≈ 6 orde dibandingkan proses hamburan Raman resonansi sekalipun (Gambar 23). Dengan demikian perlu dicari suatu strategi agar dapat diperoleh suatu daerah pengukuran di mana proses hamburan Raman tidak berkompetisi dengan proses emisi fluoresensi. Strategi ini harus dibayar mahal secara instrumentasi.

Terdapat dua strategi utama dalam memisahkan proses hamburan Raman dari proses fluoresensi, yaitu pemisahan pada domain frekuensi atau panjang gelombang dan pemisahan pada domain waktu. Pada strategi pertama, yaitu pada domain frekuensi, emisi fluoresensi diamati sebagai suatu puncak yang relatif lebih lebar, umumnya jauh lebih lebar dari puncak Raman. Puncak-puncak emisi fluoresensi umumnya tidak bergantung pada frekuensi atau panjang gelombang laser pengeksitasi, seperti yang telah dibahas sebelumnya berkenaan dengan aturan Kasha. Oleh karena itu pemilihan panjang gelombang laser yang tepat, pada daerah yang tidak dicakup oleh spektrum emisi fluoresensi menjadi suatu solusi. Eksitasi pada rentang UV, misalnya pada 325 nm, atau pada rentang NIR, misalnya pada 785 nm, akan menghasilkan spektrum hamburan Raman yang bersih tanpa gangguan emisi fluoresensi (Gambar 35a). Strategi kedua, yaitu pada domain waktu, proses hamburan Raman dan emisi fluoresensi menunjukkan waktu hidup (*life time*) yang jauh berbeda, di mana proses hamburan Raman umumnya berlangsung jauh lebih cepat dari proses emisi fluoresensi (Gambar 35b). Penggunaan pengeksitasi berupa laser berpulsa (*pulsed laser*) dan detektor yang tercacah waktu (*time-resolved detector*), seperti fotodiode cepat (*fast photodiode*), *fast photomultiplier tube* (PMT), *streak camera*, dan *gated CCD*,

memungkinkan pemisahan dalam pengukuran sinyal hamburan Raman terhadap sinyal emisi fluoresensi.



(a)



(b)

Gambar 35 Proses hamburan Raman dan emisi fluoresensi pada (a) domain frekuensi atau panjang gelombang dan (b) domain waktu (Rzhevskii, 2021).

Dengan menggunakan spektroskopi vibrasional, para peneliti dapat memperoleh informasi yang sangat berharga tentang struktur dan sifat molekul. Ini termasuk penentuan konsentrasi molekul dalam sampel, analisis komposisi kimia, dan pemahaman tentang dinamika molekul. Teknik-teknik ini telah menjadi alat yang tak tergantikan dalam berbagai bidang, termasuk kimia, biologi, fisika, dan ilmu material. Dengan terus berkembangnya teknologi dan metode baru, spektroskopi vibrasional akan terus memainkan peran penting dalam penelitian ilmiah dan aplikasi industri di masa depan, terutama pada bidang material maju. Spektroskopi vibrasional tidak hanya memberikan wawasan mendalam tentang struktur dan sifat material pada tingkat molekuler, tetapi juga memungkinkan pengembangan material baru

ke arah yang lebih fundamental dan inovatif. Berikut sisi dalam pengembangan material maju di mana spektroskopi vibrasional dapat digunakan:

Karakterisasi Struktur Material. Spektroskopi vibrasional, seperti spektroskopi absorpsi inframerah (IR) dan hamburan Raman, digunakan untuk mengkarakterisasi struktur material. Teknik ini memungkinkan para peneliti untuk mengidentifikasi ikatan kimia dan gugus fungsi dalam material, serta memahami bagaimana atom-atom dalam material tersebut tersusun dan berinteraksi satu sama lain. Informasi ini sangat penting dalam pengembangan material baru dengan sifat-sifat unggul yang diinginkan.

Dinamika Molekuler material: Spektroskopi vibrasional dapat digunakan untuk mempelajari dinamika molekuler dalam suatu material. Hasil karakterisasi spektroskopi vibrasional dapat dengan cukup mudah untuk dibandingkan dengan berbagai teknik komputasi, baik sebagai teknik validasi maupun data pelengkap. Dengan mengamati dinamika pada tingkat molekuler dalam suatu material, para peneliti dapat memahami bagaimana atom-atom/molekul-molekul dalam suatu material bergerak dan berinteraksi. Informasi ini dapat digunakan untuk memahami dan mengoptimasi berbagai sifat dari material tersebut, termasuk strategi dalam sintesisnya.

Pengembangan Material Nano: Dalam pengembangan material nano, spektroskopi vibrasional, terutama spektroskopi hamburan Raman banyak digunakan untuk mempelajari sifat-sifat unik dari material yang berukuran nanometrik. Teknik ini memungkinkan para peneliti untuk mengidentifikasi perubahan dalam struktur dan sifat material ketika ukurannya dkecilkan hingga berskala nanometrik.

Analisis Material Polimer: Spektroskopi vibrasional, mencakup teknik spektroskopi absorpsi inframerah dan hamburan Raman sangat berguna dalam analisis material polimer. Teknik ini digunakan untuk mempelajari struktur dan sifat polimer, termasuk orientasi rantai polimer, interaksi antarrantai, dan keberadaan gugus fungsi.

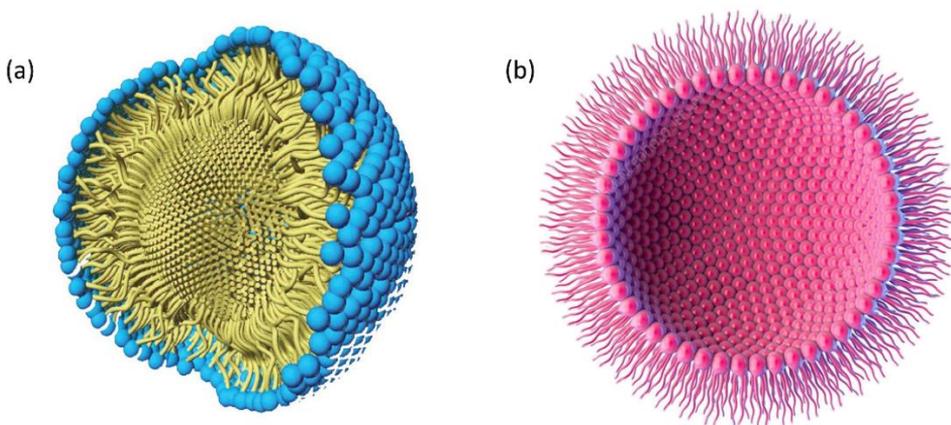
Studi Material Kristal dan Amorf: Spektroskopi vibrasional, terutama spektroskopi hamburan Raman marak digunakan untuk mempelajari material kristalin dan amorf. Dalam material kristalin, teknik ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi mode vibrasi yang terkait dengan struktur

kristal. Dalam material amorf, spektroskopi vibrasional dapat digunakan untuk memahami distribusi ikatan, keberadaan cacat, dan interaksi antargugus fungsi dan atom.

Pemantauan Proses Produksi: Spektroskopi vibrasional digunakan untuk pemantauan proses produksi material secara *real-time*. Dengan menggunakan teknik ini, produsen dapat memantau parameter kritis selama proses produksi, seperti komposisi kimia dan struktur material.

Pengembangan Material Energi: Dalam pengembangan material maju untuk aplikasi energi, seperti baterai, superkapasitor, dan sel surya, spektroskopi vibrasional digunakan untuk memahami struktur dan sifat dari masing-masing komponen, serta untuk mempelajari interaksi antara komponen-komponen penyusun devais. Teknik ini membantu dalam proses optimasi kinerja dan stabilitas material energi sebelum dan setelah diaplikasikan dalam bentuk devais.

7 BERBAGAI APLIKASI SPEKTROSKOPI MOLEKUL DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL MAJU



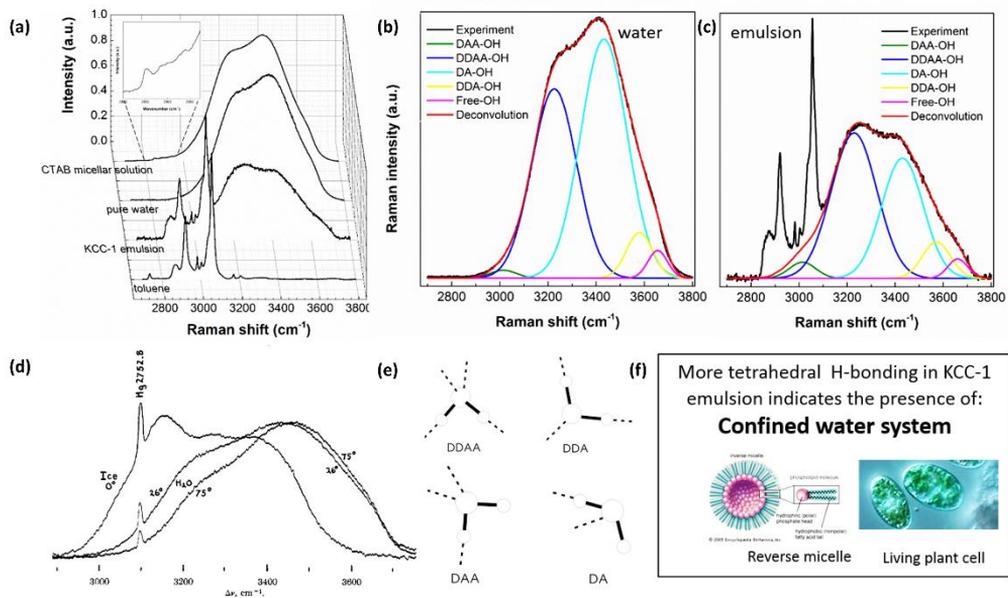
Gambar 36 (a) Misel biasa (Lemonick, 2019) dan (b) misel terbalik (De Angelis, 2024).

Dari berbagai studi spektroskopi molekul yang berkaitan dengan material maju, yang dilakukan sepanjang karier penelitian sebagai dosen di lingkungan Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, kami memilih beberapa contoh kasus sebagai berikut:

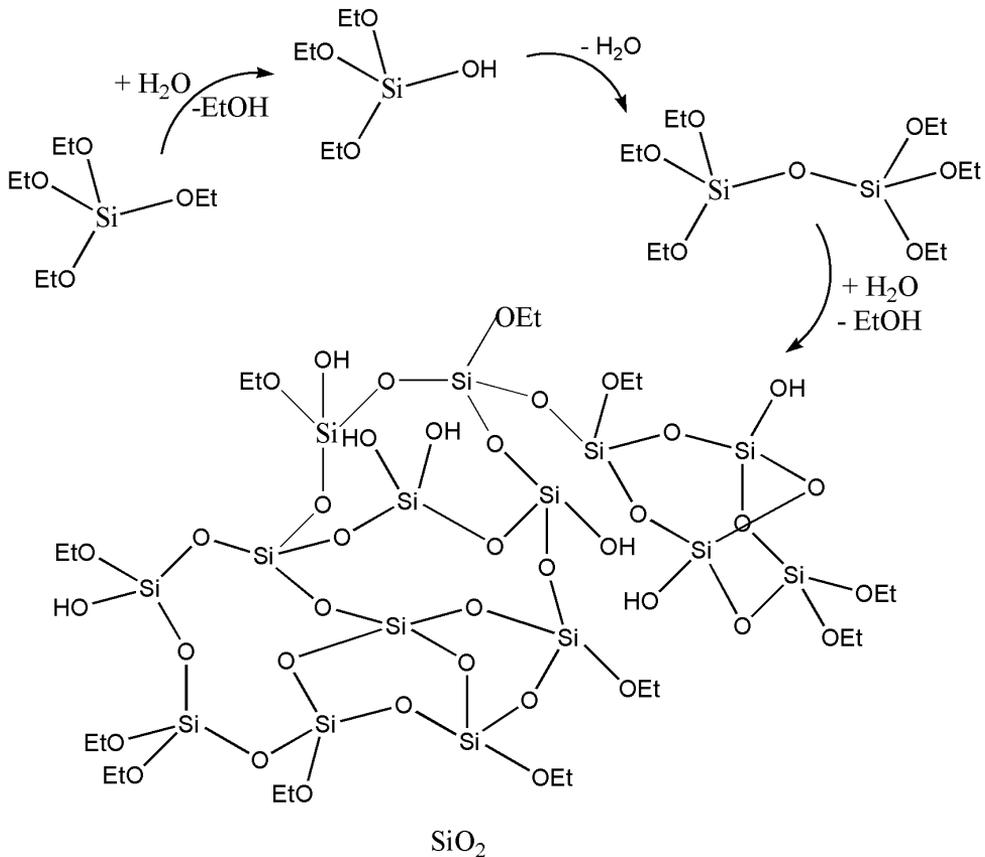
Penentuan mekanisme pembentukan partikel silika berstruktur nano bermorfologi *bicontinuous concentric lamellar (bcl)* menggunakan spektroskopi vibrasional (Febriyanti dkk., 2016, 2022).

Penentuan mekanisme pembentukan partikel silika bermorfologi *bicontinuous concentric lamellar (bcl)* atau yang dikenal sebagai KCC-1 dimulai dari penentuan struktur misel (*micelle*) yang menjadi *soft template* bagi partikel silika tersebut. Dalam sintesisnya *soft template* dibentuk dari surfaktan berjenis CTAB (*Cetyltrimethylammonium bromide* – setiltrimetilamonium bromide) dengan fasa minyak berupa toluene, dan kosolven berupa n-butanol dalam air. Terdapat dua kemungkinan jenis misel yang dapat terbentuk, yaitu berupa misel biasa atau misel terbalik (Gambar 36). Hal yang menjadi masalah dalam sintesis ini adalah surfaktan CTAB mampu membentuk kedua jenis misel ini bergantung dari komposisi dan kondisi campuran emulsi yang disiapkan. Oleh karena itu struktur misel ini harus ditentukan secara spektroskopi, di mana mode vibrasi dari molekul air akan menjadi kuncinya. Dalam penentuan struktur misel ini, mode vibrasi dari molekul air diamati

menggunakan teknik spektroskopi hamburan Raman (Gambar 37a). Hasil dekonvolusi spektrum hamburan Raman bagi mode regang OH menunjukkan bahwa komponen tetrahedral DDAA-OH lebih dominan pada emulsi dibandingkan pada air murni (Gambar 37a dan b). Keberadaan komponen tetrahedral DDAA-OH (Gambar 37d) juga ditemukan lebih dominan pada sistem es dibandingkan air bebas (Gambar 37c) dan sistem air terkungkung layaknya dalam sel tumbuhan (Gambar 37f). Hal ini membuktikan bahwa emulsi yang digunakan dalam sintesis silika *bcl* atau KCC-1 memiliki sistem air terkungkung atau memiliki struktur misel terbalik.



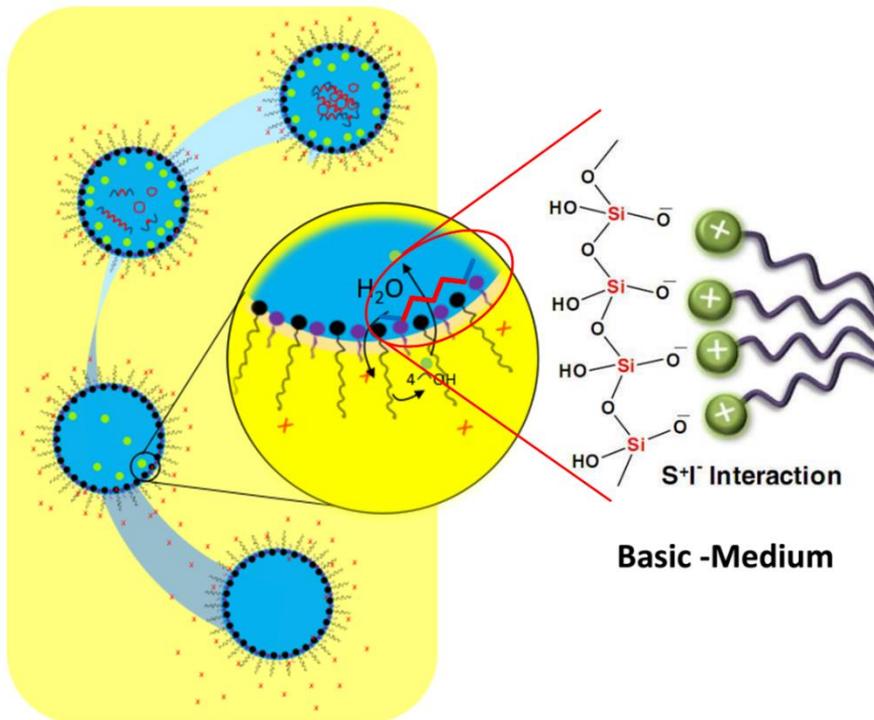
Gambar 37 (a) Spektrum hamburan Raman emulsi dan komponen penyusul emulsi, (b) dekonvolusi spektrum hamburan Raman mode vibrasi regang OH air murni, (c) dekonvolusi spektrum hamburan Raman mode vibrasi regang OH emulsi (Febriyanti dkk., 2016), (d) spektrum hamburan Raman regang OH air dan es pada berbagai suhu (Cross, dkk., 1937), dan (e) struktur skematis dari berbagai jenis ikatan hidrogen pada molekul air yang memengaruhi mode vibrasi regang OH (Sun, 2013). (f) Ilustrasi keberadaan air terkungkung pada misel terbalik dengan analogi keberadaan air di dalam sel tanaman.



Gambar 38 Mekanisme polimerisasi monomer TEOS menjadi polisiloksan melewati tahap hidrolisis dan kondensasi sebelum berikatsilang dan membentuk padatan silika (SiO₂).

Pembentukan partikel silika di dalam *soft template* akan mengikuti mekanisme polimerisasi TEOS menjadi polisiloksan yang melewati tahap hidrolisis dan kondensasi (Gambar 38). Polisiloksan yang terbentuk kemudian akan saling berikat silang dan membentuk suatu padatan silika (SiO₂). Mekanisme ini sudah cukup dikenal akan tetapi karena TEOS bersifat kurang polar dan lebih suka berada pada fasa minyak, bagaimana proses hidrolisis yang membutuhkan air dapat terjadi pada TEOS menjadi salah satu pertanyaan dalam mekanisme pembentukan silika *bcl*. Gambar 39 menggambarkan hipotesis di mana molekul TEOS akan mengalami hidrolisis pada antarmuka minyak/air dari misel terbalik, sebelum berdifusi ke fasa air dalam keadaan terhidrolisis sebagian. Setelah memasuki fasa air, monomer TEOS yang terhidrolisis sebagian akan mulai mengalami reaksi kondensasi dengan monomer membentuk polisiloksan yang distabilkan oleh keberadaan gugus polar dari surfaktan pada sisi dalam misel terbalik. Pembuktian

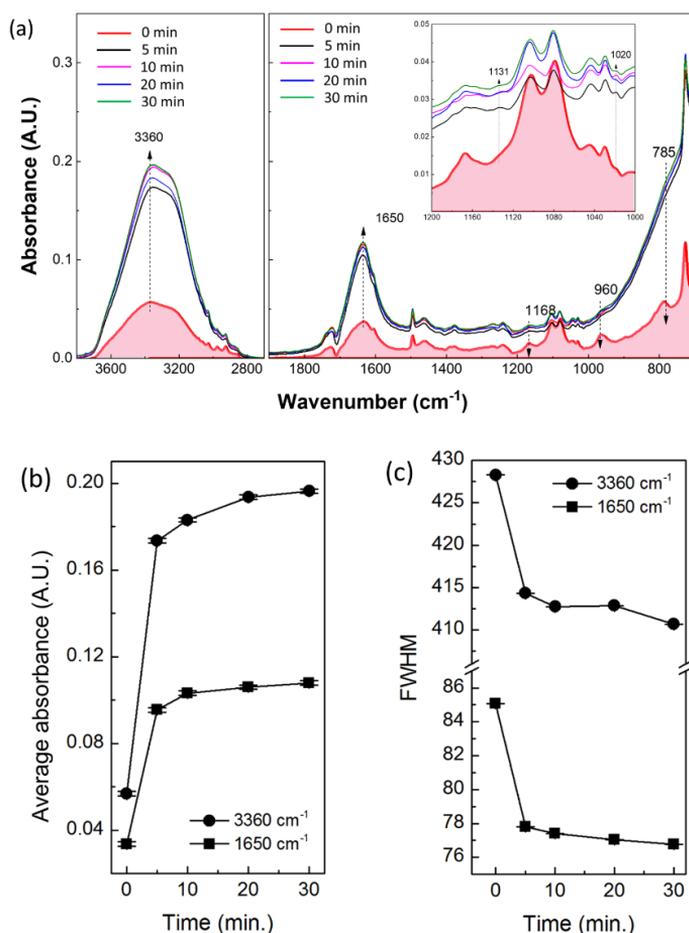
hipotesis ini tidak mudah, karena ada tiga hal yang harus dibuktikan, pembentukan gugus OH pada tahap hidrolisis, konsumsi gugus OH pada tahap kondensasi, dan reaksi hidrolisis terjadi di sekitar antarmuka minyak/air.



Gambar 39 Mekanisme hidrolisis TEOS dan proses difusi dari TEOS terhidrolisis ke dalam misel terbalik yang disusul oleh proses polimerisasi kondensasi membentuk polisiloksan yang distabilkan oleh keberadaan gugus polar dari surfaktan.

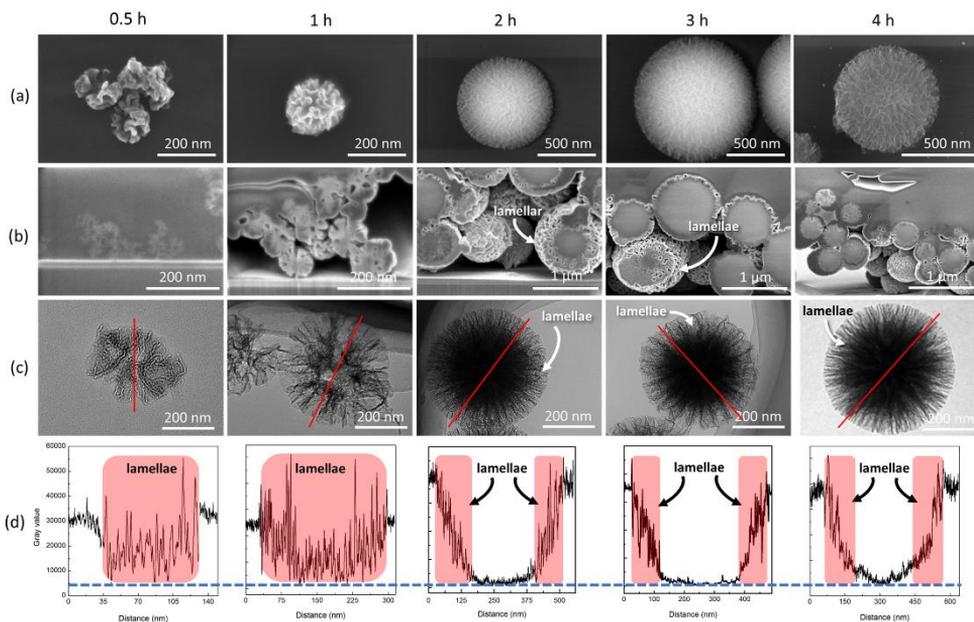
Kembali lagi mode vibrasi OH menjadi kunci yang akan digunakan dalam pembuktian hipotesis ini. Pada pembuktian hipotesis ini akan digunakan spektroskopi absorpsi inframerah dengan teknik spektroskopi ATR FT-IR (*Attenuated total reflectance Fourier Transform Infrared*). Setelah reaksi berlangsung akan diamati bahwa absorbansi dari mode regang (3360 cm^{-1}) dan tekuk (1650 cm^{-1}) OH meningkat secara drastis menuju nilai saturasi (Gambar 40a dan b). Naiknya absorbansi dari mode regang (3360 cm^{-1}) dan tekuk (1650 cm^{-1}) OH secara drastis mengindikasikan terjadinya proses hidrolisis, sedangkan nilai yang menuju saturasi mengindikasikan adanya proses konsumsi menyertai dengan laju yang kurang lebih sama, yaitu proses kondensasi. Pembuktian berlangsungnya reaksi di sekitar antarmuka minyak/air dari misel terbalik didukung oleh turunnya nilai lebar puncak dari

kedua puncak mode vibrasi OH menuju saturasi (Gambar 40c) (Febriyanti dkk., 2022). Berkurangnya lebar puncak dari mode vibrasi gugus fungsi yang terlibat dalam reaksi selama reaksi berlangsung sangatlah tidak lazim, dalam hal ini reaksi hidrolisis. Umumnya lebar puncak akan meningkat, mengingat dalam pembentukan dan pemutusan ikatan kovalen akan selalu meninggalkan artefak energetik, terutama jika dihasilkan molekul kecil seperti etanol dan air dalam reaksi kondensasi yang meningkatkan entropi. Keberadaan antarmuka minyak/air akan menstabilkan hasil reaksi pada antarmuka sehingga menghasilkan vibrasi OH yang lebih teratur. Kondisi vibrasi OH yang lebih teratur ini dicapai jauh lebih cepat dari proses disipasi panas yang mungkin terjadi akibat tumbukan dengan molekul pelarut.

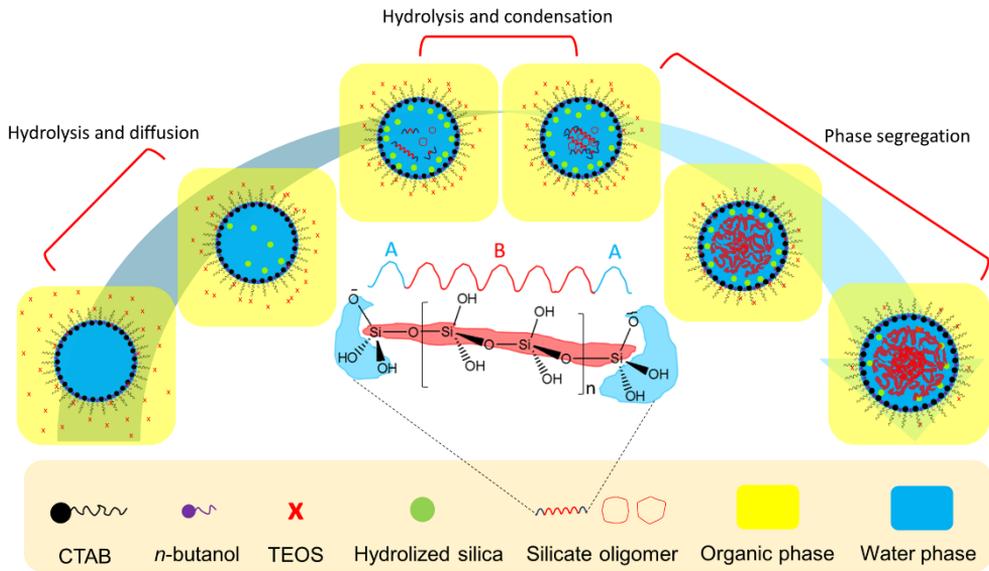


Gambar 40. (a) Evolusi spektrum absorpsi inframerah selama proses hidrolisis kondensasi pada campuran emulsi, (b) plot absorbansi dari mode regang (3360 cm⁻¹) dan tekuk (1650 cm⁻¹) OH, dan (c) lebar puncak FWHM (*full width at half maximum*) dari mode regang (3360 cm⁻¹) dan tekuk (1650 cm⁻¹) OH (Febriyanti dkk., 2022).

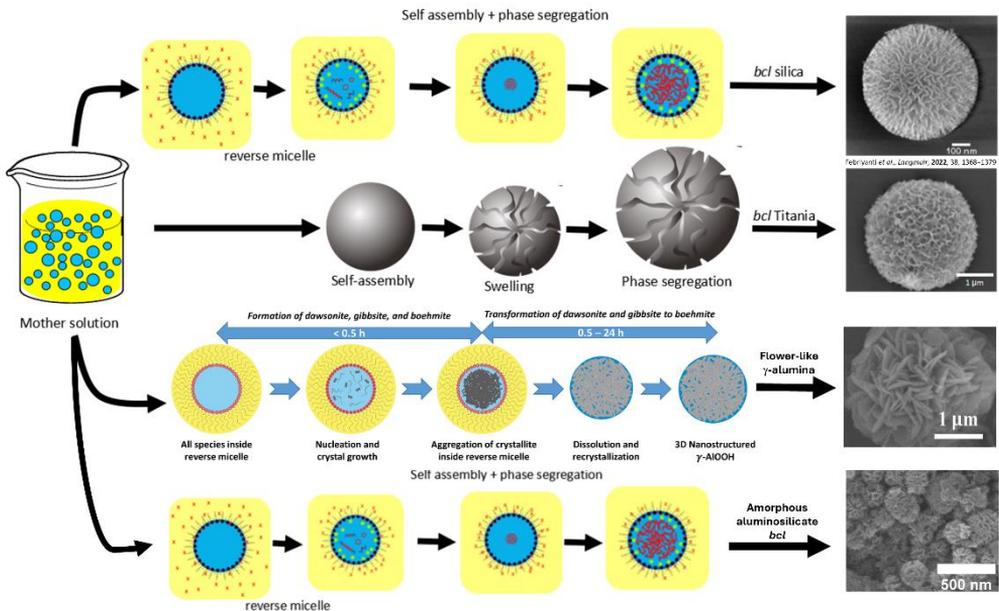
Berdasarkan hasil spektroskopi vibrasional yang dibantu oleh hasil analisis mikroskopi elektron terhadap serangkaian sampel kinetika klasik dari silika *bcl* dengan memvariasikan waktu sintesis (Gambar 41), dapat disusun suatu mekanisme pembentukan partikel silika *bcl* yang mengikuti tahap-tahap sebagai berikut, yaitu tahap hidrolisis-difusi, tahap hidrolisis-kondensasi, dan tahap segregasi fasa (Gambar 42) (Febriyanti, dkk., 2022). Menggunakan analogi dan ide yang sama telah berhasil dikembangkan berbagai material berbeda dengan morfologi yang mirip, di antaranya adalah silika *bcl*, titania *bcl*, *flowerlike* γ -alumina, dan *bcl* aluminosilikat amorf (Gambar 43) (Benu, dkk., 2021; Febriyanti dkk., 2016; Steky dkk., 2019).



Gambar 41 Analisis mikroskopi elektron terhadap serangkaian sampel kinetika klasik dari silika *bcl* dengan memvariasikan waktu sintesis: (a) FESEM (*field emission scanning electron microscopy*), (b) FIB-FESEM (*focused ion beam – field emission scanning electron microscopy*), (c) HRTEM (*High resolution transmission electron microscopy*), dan (d) nilai profil abu-abu (*gray profile value*) dari (c) (Febriyanti, dkk., 2022).



Gambar 42 Mekanisme pembentukan partikel silika *bcl* yang mengikuti tahap-tahap: hidrolisis-difusi, hidrolisis-kondensasi, dan segregasi fasa (Febriyanti dkk., 2016, 2022).



Gambar 43 Gambaran umum mekanisme pembentukan berbagai partikel bermorfologi *bcl* yang telah dikembangkan berdasarkan mekanisme pembentukan partikel silika *bcl* (Benu, dkk., 2021; Febriyanti, dkk., 2016; Steky, dkk., 2019).

Penentuan ukuran riil dari molekul dengan menggunakan spektroskopi fotoluminesensi bergantung suhu (Nurhayati dkk., 2020).

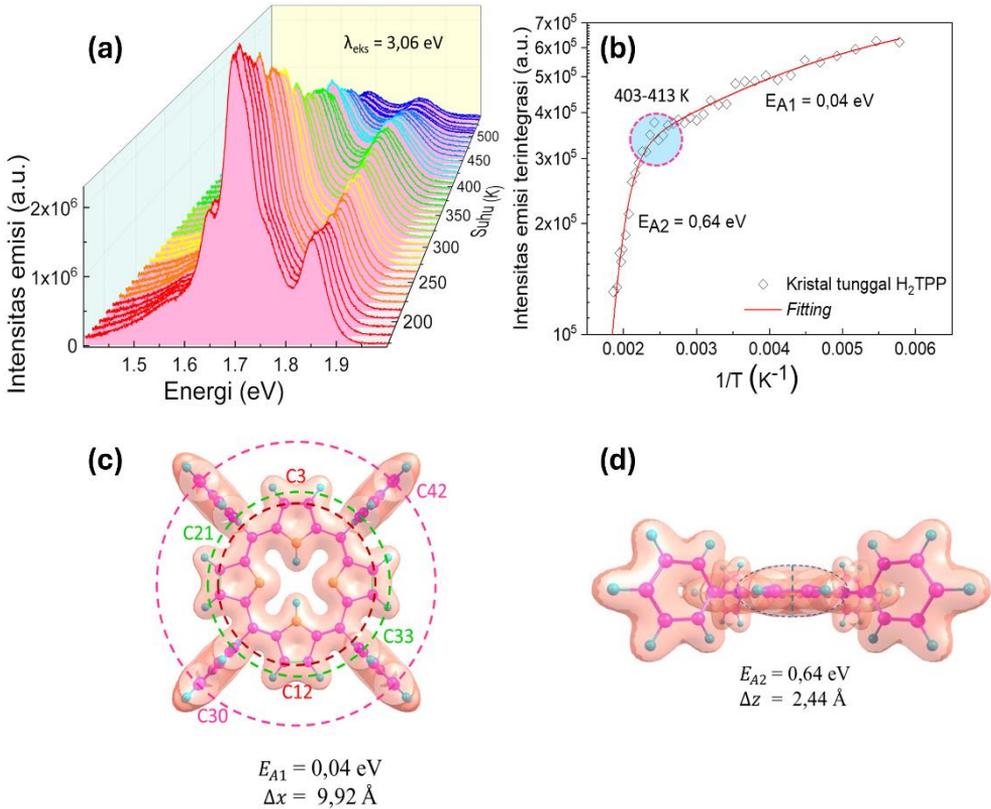
Penentuan ukuran suatu molekul mungkin terlihat sebagai suatu persoalan yang cukup mudah, mengingat telah banyak informasi terkait dengan struktur atom dan molekul telah banyak tersedia dan mudah di akses. Hal ini dipermudah dengan telah maraknya berbagai perangkat lunak yang memfasilitasi komputasi molekuler baik yang bersifat klasik (*molecular dynamics, molecular mechanics, ...*) maupun kuantum (*ab initio, Density functional theory, ...*). Akan tetapi jika kita bahas lebih dalam, data-data dan perangkat lunak tersebut hanya memberikan informasi mengenai panjang ikatan, jarak antar-atom dalam satu molekul, jarak antar-atom pada molekul yang bersebelahan, dan jarak antarmolekul sebagai jarak antara dua pusat massa. Ukuran dari awan elektron yang menyelimuti molekul tersebut cukup sulit untuk ditentukan baik secara komputasi maupun eksperimental.

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk menentukan ukuran dari awan elektron ini adalah dengan memanfaatkan sifat kungkungan kuantum dari elektron pada sistem ikatan π terkonjugasi yang memiliki analogi dengan model partikel dalam kotak. Pendekatan ini memiliki keterbatasan, yaitu hanya dapat diterapkan pada molekul dengan ikatan π terkonjugasi yang memiliki emisi fluoresensi atau fotoluminesensi yang cukup kuat dalam bentuk kristalnya. Secara sederhana energi kungkungan kuantum dari suatu kotak satu dimensi pada arah j dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_j = \frac{\hbar^2}{2m_e(\Delta j)^2}, \quad j = x, y, z \quad (7.1)$$

dengan \hbar adalah tetapan Planck tereduksi ($\hbar = h/2\pi$), m_e adalah massa elektron diam, dan Δj adalah ketidakpastian posisi elektron sepanjang sumbu j yang sekaligus menyatakan ukuran kungkungan pada arah tersebut. Berdasarkan nilai E_j yang diperoleh secara eksperimental dan Persamaan 7.1, kita dapat menghitung ukuran kungkungan kuantum pada masing-masing sumbu, yaitu Δx , Δy , dan Δz . Secara eksperimental nilai E_j dapat diperoleh dengan mengganggu proses fluoresensi atau fotoluminesensi dari molekul target menggunakan suhu dengan melakukan pengukuran spektroskopi fotoluminesensi bergantung suhu. Pada studi ini digunakan molekul TPP

(tetraphenylporphyrin) yang merupakan suatu molekul dengan ikatan π terkonjugasi dan emisi fotoluminesensi yang kuat.



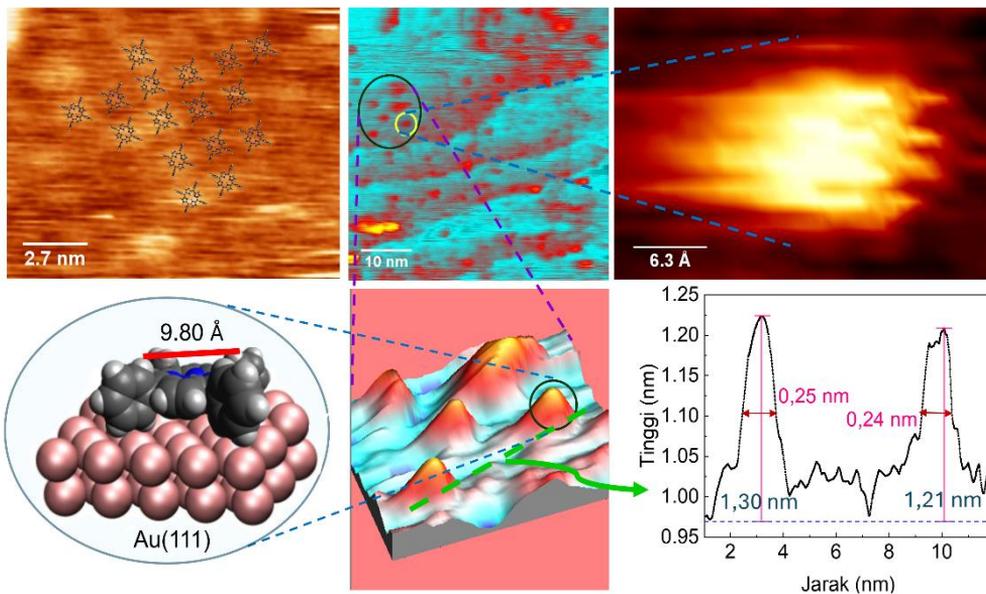
Gambar 44 (a) Spektrum emisi luminesensi pada berbagai suhu pengukuran, (b) intensitas emisi terintegrasi sebagai fungsi suhu pengukuran, model kungkungan kuantum yang diwakili oleh (c) diameter molekul, dan (d) tebal molekul (Nurhayati dkk., 2020).

Intensitas spektrum fotoluminesensi akan cenderung menurun dengan meningkatnya suhu (Gambar 44a), di mana gangguan berupa gerak vibrasional akan meningkatkan probabilitas proses rekombinasi non-radiatif yang berkompetisi dengan proses rekombinasi radiatif, yaitu proses fotoluminesensi. Energi kungkungan kuantum di sini berperan dalam menjaga proses rekombinasi radiatif dari gangguan peningkatan suhu. Jika spektrum emisi fotoluminesensi tersebut diintegrasikan dan intensitas emisi terintegrasinya dialurkan terhadap kebalikan suhu (*reciprocal of temperature*) maka akan diperoleh Gambar 44b. Dapat dilakukan *fitting* terhadap plot intensitas emisi terintegrasi sebagai fungsi kebalikan suhu menggunakan Persamaan Arrhenius untuk sistem 3 dimensi. Proses *fitting* dapat

mengekstraksi energi kungkungan kuantum pada arah x , y , dan z . Oleh karena molekul TPP adalah suatu molekul yang simetrik, energi kungkungan pada arah x dan y dapat dianggap sama, sehingga hanya ada dua energi kungkungan kuantum yang masing-masing merepresentasikan diameter dan tebal molekul (Gambar 44c dan d) (Nurhayati dkk., 2020). Berdasarkan hal ini, Persamaan Arrhenius untuk sistem 3 dimensi dapat dimodifikasi menjadi Persamaan 7.2 yang lebih sederhana sebagai berikut:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + C_1 e^{-\left(\frac{E_{A1}}{k_B T}\right)} + C_2 e^{-\left(\frac{E_{A2}}{k_B T}\right)}} \quad (7.2)$$

dengan I_0 adalah parameter *fitting*, k_B adalah tetapan Boltzmann, konstanta C_1 dan C_2 masing-masing terkait dengan amplitudo pusat rekombinasi non-radiatif, E_{A1} dan E_{A2} adalah energi kungkungan kuantum masing-masing pada arah x/y dan z , yang merupakan energi aktivasi bagi masing-masing proses rekombinasi non-radiatif.



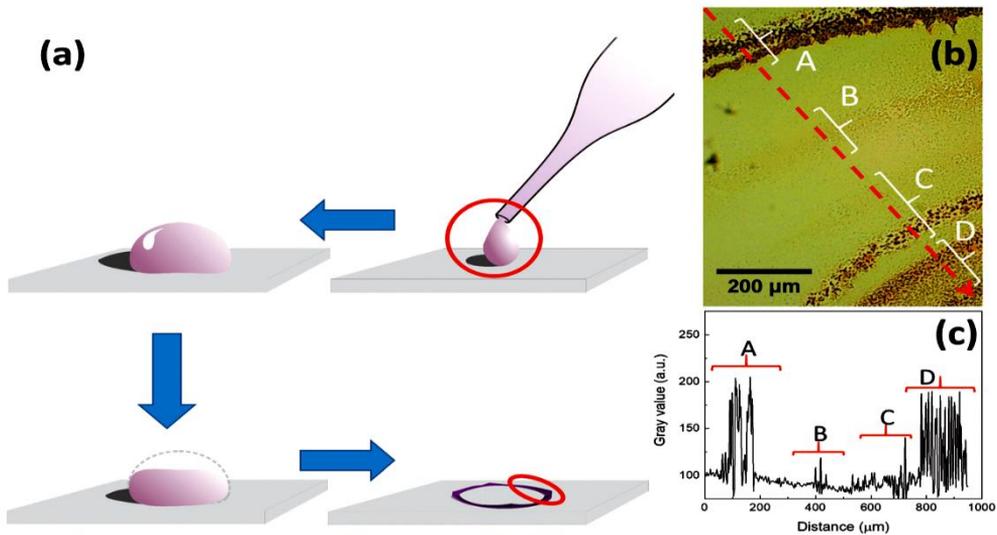
Gambar 45 Citra *scanning tunnelling microscopy* (STM) dari molekul TPP (*tetraphenylporphyrin*) yang dideposisikan diatas permukaan emas Au(111) yang menghasilkan lebar dan tebal molekul TPP masing-masing sekitar 9,8 Å dan 2,45 Å (Nurhayati dkk., 2020).

Hasil *fitting* plot pada Gambar 44b menggunakan Persamaan 7.2 akan menghasilkan E_{A1} dan E_{A2} dengan nilai masing 0,04 eV dan 0,64 eV, yang jika dihitung dengan menggunakan Persamaan 7.1 akan menghasilkan ukuran

kungkungan kuantum Δx dan Δz dengan ukuran masing-masing 9,92 Å dan 2,44 Å. Hasil ini ternyata sangat dekat dengan hasil pengamatan menggunakan teknik *scanning tunnelling microscopy* (STM), yang menghasilkan lebar dan tebal molekul masing-masing sekitar 9,8 Å dan 2,45 Å (Gambar 45) (Nurhayati, dkk., 2020).

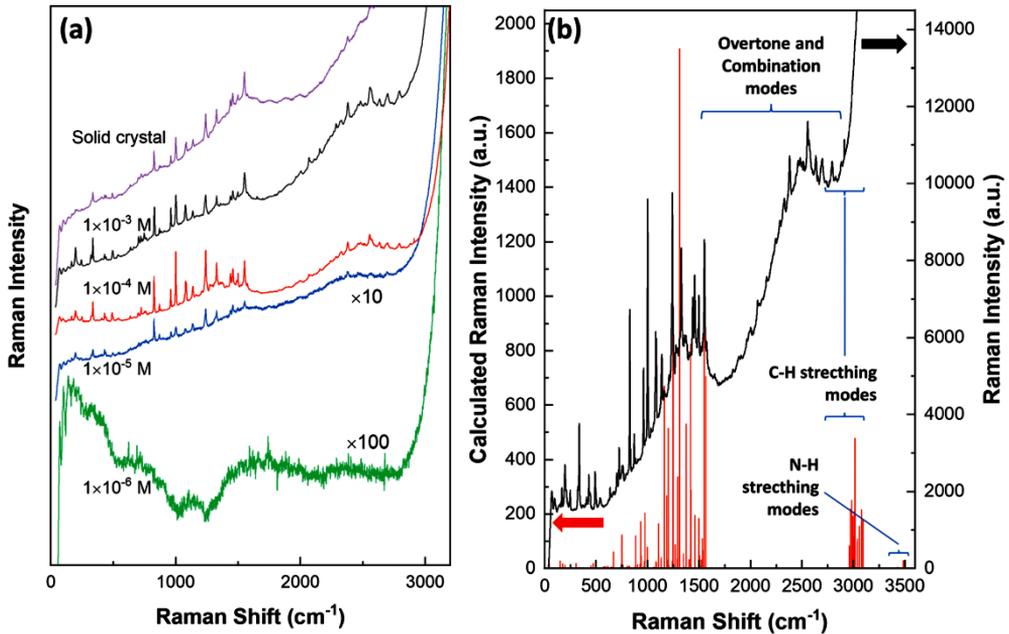
Peningkatan sinyal Raman dengan menggunakan teknik *drop coating deposition Raman* (DCDR) pada permukaan substrat konduktif (Milana, dkk., 2021).

Pengukuran spektroskopi hamburan Raman pada suatu sampel yang memiliki emisi fluoresensi kuat merupakan suatu permasalahan teknis yang menantang. Seperti yang telah dipaparkan pada bagian spektroskopi vibrasional bahwa perolehan kuantum dari proses emisi fluoresensi berkisar 6 hingga 10 orde lebih besar dibandingkan dengan proses hamburan Raman. Hal ini menyebabkan banyak teknik pengukuran dikembangkan terlepas dari dua strategi yang dikembangkan secara instrumentasi. Salah satu teknik yang cukup menjanjikan adalah dengan menggunakan teknik *drop coating deposition Raman* (DCDR) pada permukaan substrat konduktif yang juga memberikan efek SERRS (*surface enhanced Raman resonance spectroscopy*). Pada prinsipnya teknik DCDR adalah teknik prekonsentrasi yang dikembangkan berdasarkan pengamatan terhadap pembentukan noda cincin kopi (*coffee ring*) yang secara skematis ditunjukkan pada Gambar 46a. Pada studi ini, kembali digunakan senyawa TPP (*tetraphenylporphyrin*) yang merupakan molekul dengan sistem ikatan π terkonjugasi dengan emisi fluoresensi atau luminesensi sangat kuat. Pengukuran spektrum hamburan Raman dari senyawa TPP dengan menggunakan laser pengeksitasi pada rentang cahaya tampak sangatlah sulit. Gangguan dari dari emisi fluoresensi yang kuat pada rentang yang cukup lebar, yaitu 600–800 nm, menjadikan laser pengeksitasi pada rentang tersebut tidak dapat digunakan.



Gambar 46. (a) Skematik proses pembentukan pola noda cincin kopi pada substrat DCDR, (b) citra mikroskop optik dari noda cincin kopi yang dipreparasi dari larutan TPP 1×10^{-4} M pada permukaan substrat ITO (*indium thin oxide*), (c) profil nilai abu-abu dari citra mikroskop noda cincin kopi yang ditunjukkan pada (b) (Milana dkk., 2021).

Citra mikroskop optik dan profil nilai abu-abu dari citra noda cincin kopi dari senyawa TPP menunjukkan pola berupa garis-garis berbentuk lingkaran yang teratur (Gambar 46b dan c) (Milana, dkk., 2021). Masing-masing garis tersebut merupakan daerah di mana analit mengalami prekonsentrasi. Proses prekonsentrasi pada pembentukan noda cincin kopi dan keberadaan permukaan konduktif meningkatkan intensitas hamburan Raman (Gambar 47a). Hasil prekonsentrasi dari larutan TPP 1×10^{-4} M dengan teknik DCDR di atas permukaan logam emas (Au) dengan laser pengekstansi 532 nm telah memberikan intensitas dan *signal-to-noise ratio* (SNR) yang lebih baik dibandingkan spektrum hamburan Raman konvensional dari kristal padatan TPP. Diamati pula terdapat penurunan (*suppression*) intensitas fluoresensi secara signifikan pada rentang $2000\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, yang ditandai dengan teramatinya puncak *overtone* Raman pada rentang tersebut (Gambar 47b) (Milana, dkk., 2021). Teknik DCDR merupakan suatu teknik yang murah, mudah, dan cepat dalam preparasi. Biaya terbesar ada pada substrat yang digunakan, yaitu logam emas (Au), biaya ini dapat ditekan dengan penggunaan substrat berupa film tipis (*thin film*) atau substrat emas monolitik, yaitu berupa lempengan emas, yang dapat dibersihkan dan dipakai berulang.

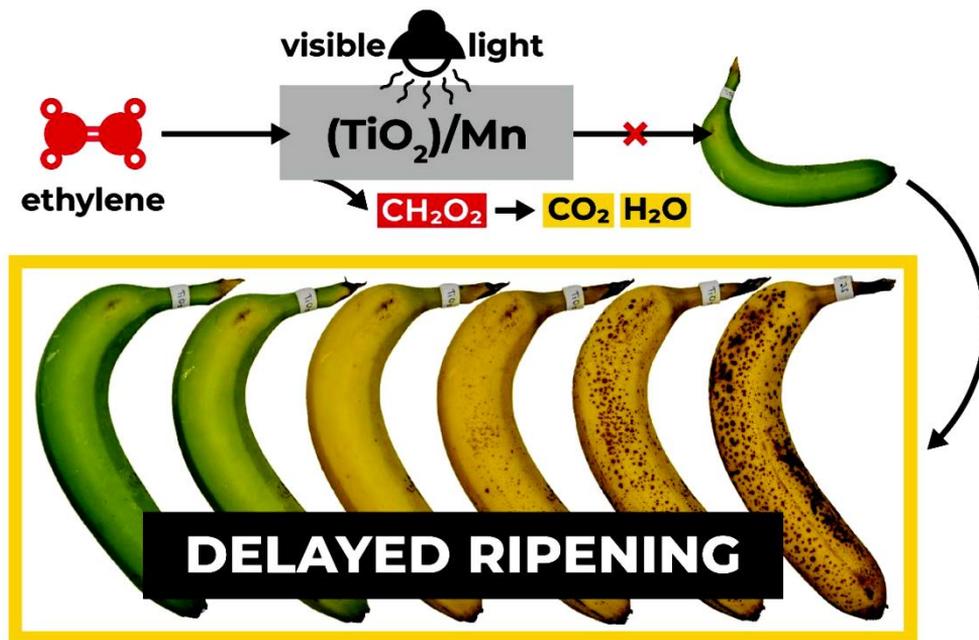


Gambar 47 (a) Spektrum DCDR dari larutan TPP pada berbagai konsentrasi dibandingkan dengan spektrum hamburan Raman konvensional dari kristal padatan TPP, (b) Perbandingan antara spektrum DCDR yang dideposisikan dari larutan TPP 1×10^{-4} M di atas permukaan 47Au (spektra kontinu berwarna hitam) dan spektrum hasil komputasi menggunakan teknik TDDFT (spektra garis merah). Puncak *overtone* dari Raman teramati pada spektrum DCDR pada rentang 2000–3000 cm^{-1} akan tetapi tidak pada spektrum Raman hasil komputasi (Milana dkk., 2021).

Pemantauan secara spektroskopi absorpsi inframerah terhadap aktivitas fotokatalis pendegradasi etilen (Nugroho dkk., 2024).

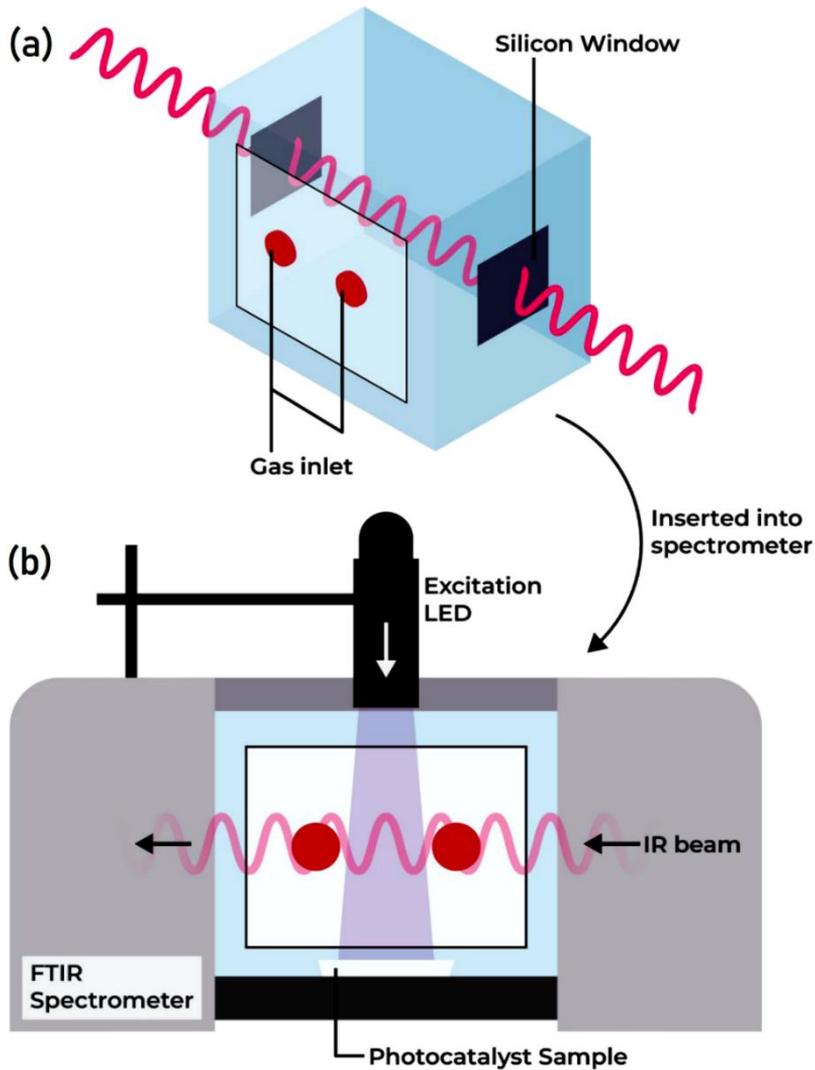
Penundaan pematangan (*delayed ripening*) adalah salah satu teknologi pascapanen yang sangat penting, terutama berkenaan dengan berbagai buah klimaterik seperti pisang yang dapat mengalami pematangan dengan cepat, terutama setelah mengalami proses pematangan secara artifisial. Pematangan yang terlalu cepat akan menyebabkan umur simpan (*shelf life*) dari buah-buahan ini menjadi sangat singkat. Umur simpan yang pendek sangatlah tidak diinginkan dari sisi ekonomi. Pada buah pisang, proses pematangan bergantung pada berbagai faktor, salah satu faktor yang terpenting adalah keberadaan hormon pematangan buah, yaitu molekul etilen. Oleh karena itu strategi penundaan pematangan yang paling sederhana adalah dengan cara menghilangkan molekul etilen yang dihasilkan oleh buah pisang. Salah satu yang strategi yang sedang marak dikembangkan adalah dengan proses fotodegradasi menggunakan fotokatalis. Pada umumnya

fotokatalis yang digunakan akan bekerja pada rentang UV, akan tetapi dalam studi ini dikembangkan fotokatalis berbasis TiO_2 yang terdekorasi mangan (Mn) yang dapat bekerja pada rentang cahaya tampak (Gambar 48) (Nugroho dkk., 2024).

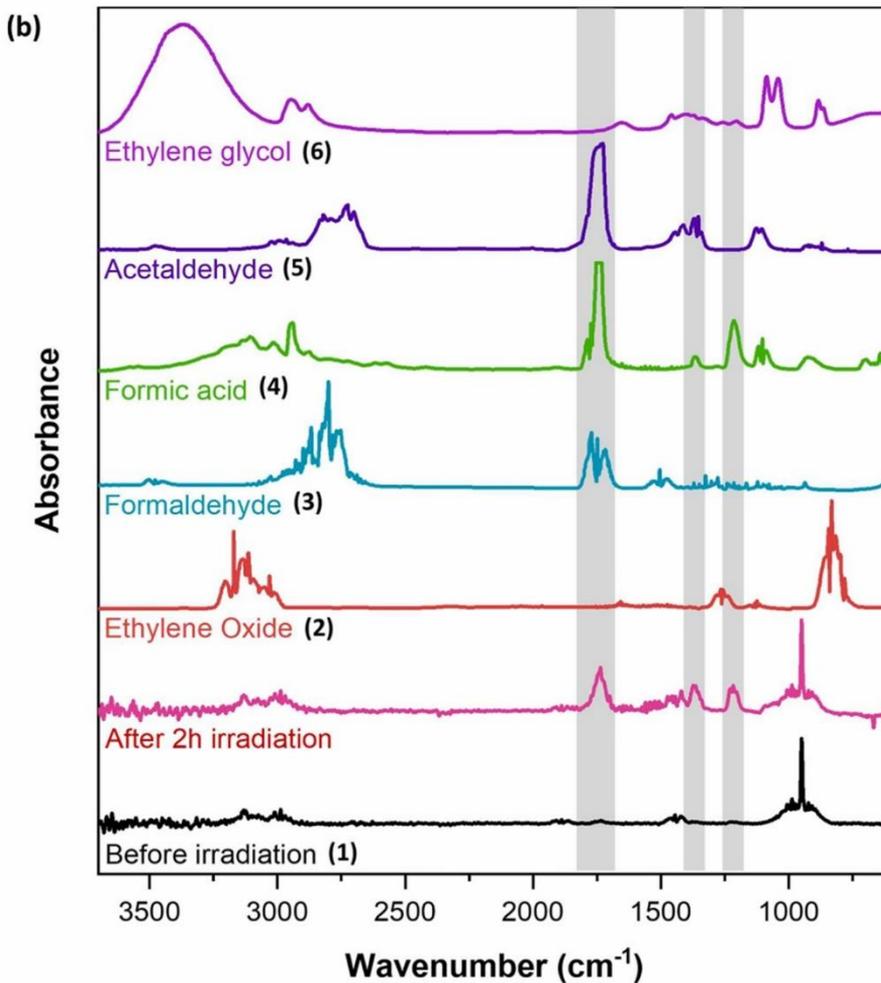
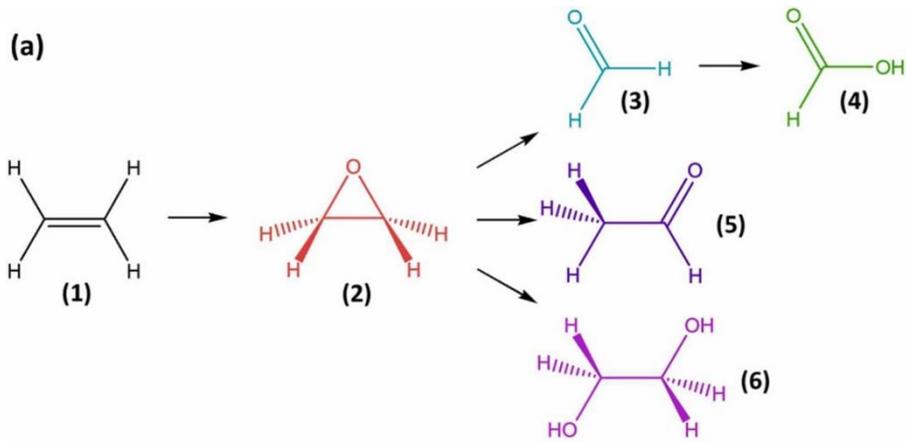


Gambar 48 Skematik fotodegradasi etilena menggunakan fotokatalis TiO_2 terdekorasi Mn pada rentang cahaya tampak dalam proses penundaan pematangan (*delayed ripening*) pisang (Nugroho dkk., 2024).

Selama ini aktivitas fotodegradasi etilen jarang diamati secara langsung. Kinerja fotokatalis umumnya dimonitor lewat hasil penundaan pematangan lewat pengamatan warna (*color measurement*), indeks pencokelatan (*browning index*), *total soluble solids* (TSS), kekerasan buah, kadar gula, serta berbagai perubahan sensorik lainnya (Anindita, dkk., 2024). Untuk mengamati secara langsung proses fotodegradasi etilen, telah dikembangkan sel fotoreaktor yang dapat dihubungkan secara langsung pada spektrometer FT-IR (Gambar 49). Menggunakan *dummy* etilen yang sengaja disuntikkan ke dalam sel fotoreaktor, dapat diamati perubahan komposisi gas di dalam sel, termasuk memonitor keberadaan zat antara dari proses degradasi etilen sebelum mengalami degradasi sempurna menjadi CO_2 dan H_2O . Beberapa zat antara yang berhasil diamati berserta spektrum absorpsi inframerahnya ditunjukkan pada Gambar 50 (Nugroho, dkk., 2024).

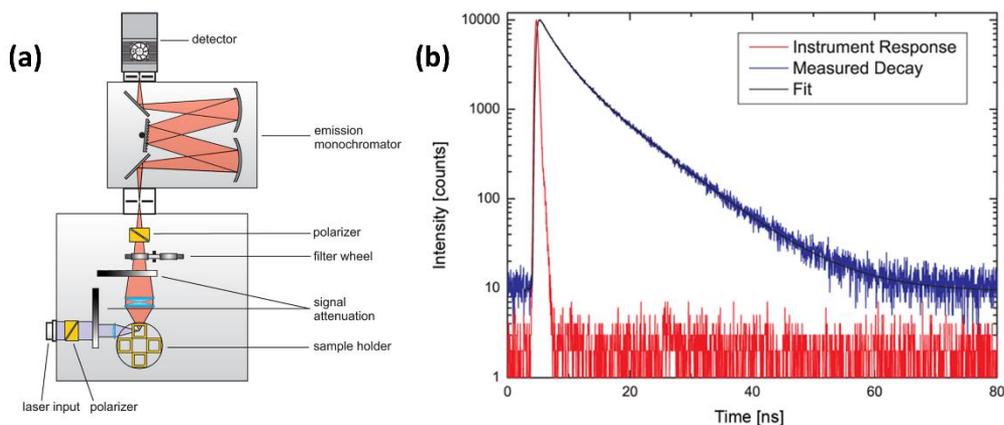


Gambar 49 Desain fotoreaktor yang digunakan untuk mengamati proses fotodegradasi etilena dengan menggunakan teknik spektroskopi FT-IR. (a) Sel fotoreaktor yang dilengkapi dengan dua jendela silikon (*silicon window*) dan saluran asupan gas (*gas inlet*). (b) Skematik fotoreaktor saat beroperasi di dalam spectrometer FTIR, di mana sampel fotokatalis disinari dengan menggunakan LED (*light emitting diode*), sedangkan perubahan komposisi gas di dalam sel fotoreaktor dimonitor oleh berkas inframerah dari spectrometer FT-IR (Nugroho dkk., 2024).



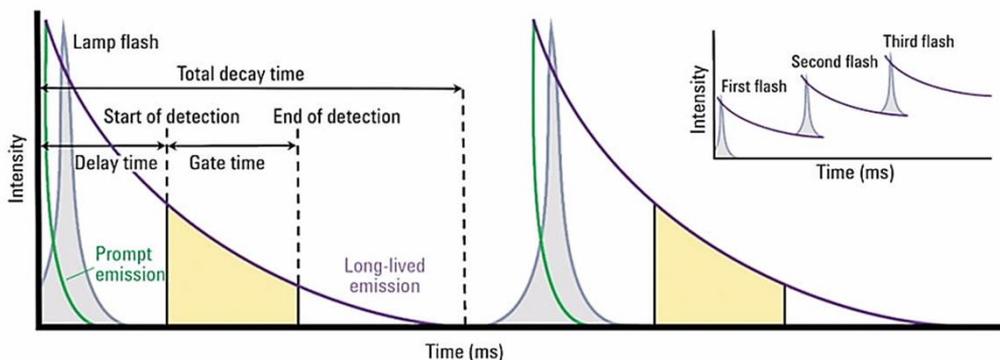
Gambar 50 (a) Beberapa kemungkinan zat antara hasil fotodegradasi etilen. (b) Perbandingan spektrum absorpsi IR dari beberapa antara zat antara dan spektrum yang dihasilkan setelah 2 jam penyinaran di bawah cahaya putih menggunakan fotokatalis TiO_2 terdecorasi Mn (TM-NaOH) (Nugroho dkk., 2024).

8 MASA DEPAN SPEKTROSKOPI MOLEKUL: MENERAWANG DINAMIKA MOLEKUL



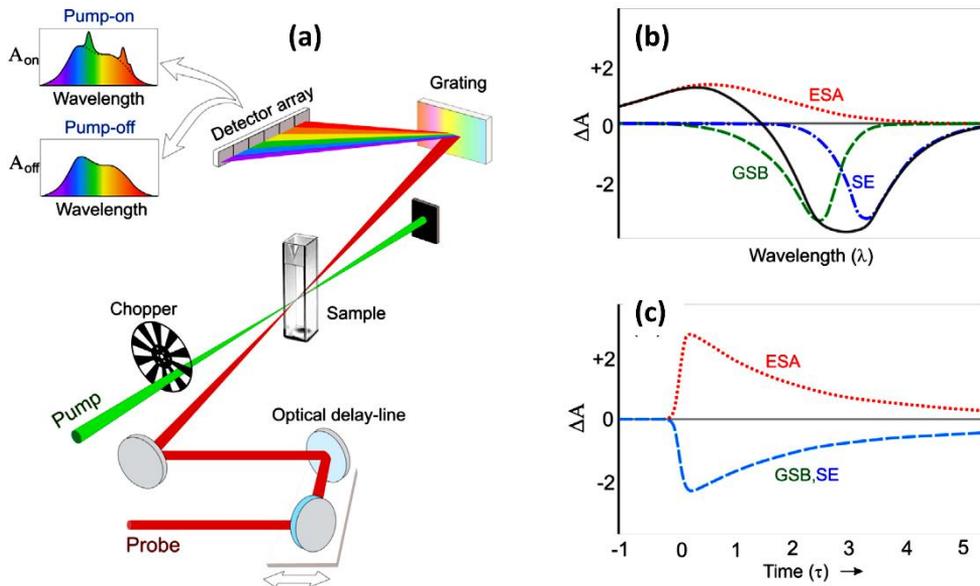
Gambar 51 (a) Skematis desain alat spektrometer fluoresensi terurai waktu (*time-resolved fluorescence spectrometer*), dan (b) data hasil pengukuran dari spektrometer fluoresensi terurai waktu yang berupa respons instrumen (garis merah) dan data peluruhan intensitas (garis biru) (PicoQuant, 2024).

Jika ada pertanyaan, akan kemanakah arah perkembangan spektroskopi molekul di masa mendatang? Mungkin salah jawabannya adalah spektroskopi molekul terurai waktu atau *time-resolved molecular spectroscopy*. Hal ini disebabkan karena dunia dinamis pada tingkat atom dan molekul masih menyimpan banyak misteri, bukan hanya karena dunia tersebut berukuran sangat kecil dan tidak dapat diamati oleh mata telanjang, akan tapi banyak sekali proses yang berlangsung dengan sangat cepat, jauh lebih cepat dari berbagai hal yang kita anggap cepat di dunia makroskopik. Dinamika molekul dan reaksi kimia selalu menjadi topik yang hangat dan terus berkembang, terutama dari sisi eksperimental sejak dikembangkannya *femtosecond spectroscopy* oleh peraih hadiah Nobel bidang Kimia tahun 1999, Prof. Ahmed H. Zewail (Zewail, 2000).



Gambar 52 Kerangka waktu dalam pengamatan spektroskopi fluoresensi terurai waktu, di mana setiap peristiwa ditandai dengan keberadaan sinyal pengeksitasi, dalam hal ini berupa lampu kilat (*flash lamp*). Waktu tunda (*delay time*) diatur agar diperoleh sinyal peluruhan yang bersih tanpa gangguan artefak dari peristiwa sebelumnya atau pun dari sinyal pengeksitasi. Setelah waktu tunda, pengamatan akan dimulai (*start of detection*) hingga akhir waktu pengamatan (*gate time*) yang menandakan pengamatan berakhir (*end of detection*). *Inset* menggambarkan proses eksitasi secara sekuensial yang menghasilkan data peluruhan yang sekuensial pula (Zieschang dkk., 2016).

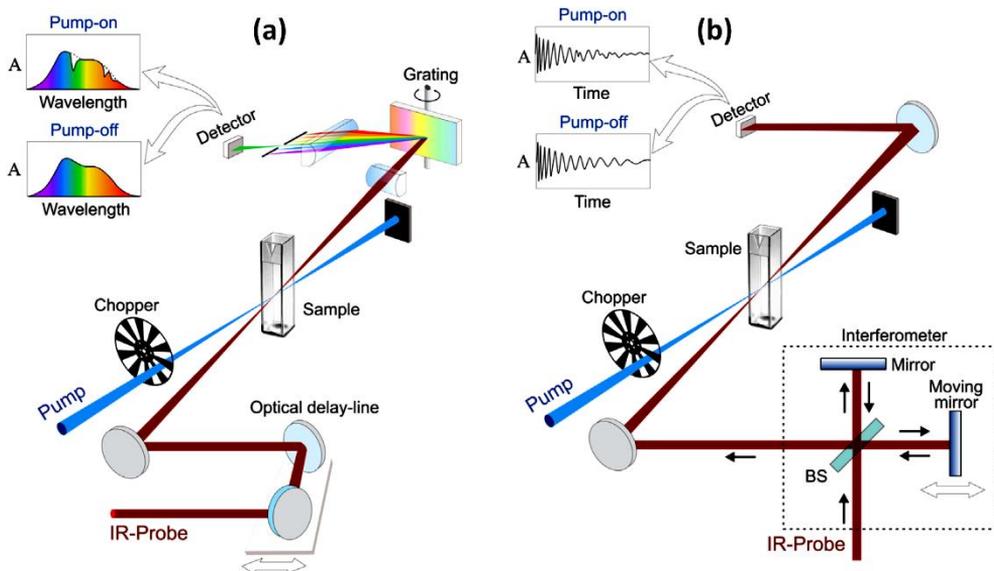
Teknik spektroskopi molekuler terurai waktu yang paling sederhana adalah spektroskopi fluoresensi terurai waktu yang skematis desain alatnya dipaparkan secara singkat pada Gambar 51a. Hasil pengukuran dari teknik ini adalah berupa respons instrumen dan data peluruhan intensitas (Gambar 51b). Respons instrumen merupakan respons dari detektor terurai waktu (*time resolved detector*) terhadap sinyal pengeksitasi yang dapat berupa laser berpulsa (*pulsed laser*) atau lampu kilat (*flash lamp*). Sedangkan data peluruhan merupakan respons dari sistem atau sampel yang mengalami fotoeksitasi akibat pereksitasi berupa cahaya berpulsa. Pada umumnya data peluruhan diamati pada rentang waktu pengamatan (*gate time*), pemilihan rentang waktu pengamatan sangat penting untuk memperoleh data peluruhan yang bersih dari artefak peristiwa sebelumnya atau pun dari sinyal pengeksitasi. Artefak dari sinyal pengeksitasi masih dapat dieliminasi lewat pengukuran respons instrumen, akan tetapi artefak dari peristiwa sebelumnya kadang tidak dapat diprediksi ataupun dikontrol. Gambar 52 memaparkan kerangka waktu dalam pengamatan spektroskopi fluoresensi terurai waktu yang berlaku pada pengamatan spektroskopi molekuler terurai waktu pada umumnya.



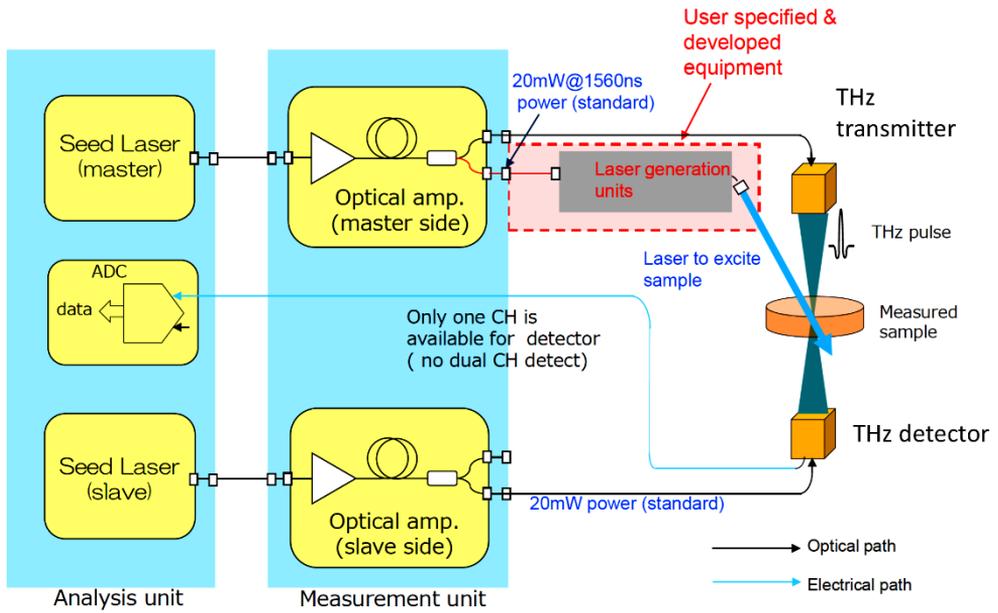
Gambar 53 (a) Skematis teknik spektroskopi absorpsi transien (*flash photolysis*) yang dilengkapi dengan komponen penundaan dan *chopper* untuk pendeteksian tertunda bagi mode *pump-on/pump-off* secara sekuensial, (b) profil spektrum, dan (c) profil untuk berbagai proses yang berkontribusi pada absorpsi transien. (ESA, *Excited-state absorption* – absorpsi keadaan-tereksitasi; GSB, *Ground-state bleach* – proses pemutihan pada keadaan-dasar; SE, *Stimulated emission* – emisi terstimulasi; dan TA, *Transient absorption* – absorpsi transien) (Gupta dan Ozaki, 2020).

Selain spektroskopi emisi terurai waktu, telah dikembangkan pula beberapa teknik spektroskopi absorpsi terurai waktu atau lebih dikenal sebagai spektroskopi absorpsi transien (*transient absorption spectroscopy*). Berdasarkan rentang panjang gelombang kerjanya, teknik spektroskopi absorpsi transien memiliki rentang yang lebih luas dibanding spektroskopi emisi terurai waktu yang biasanya hanya mencakup rentang UV-Vis untuk sinyal pengeksitasi dan Vis-NIR untuk pengamatan data peluruhan intensitas. Spektroskopi absorpsi transien mencakup rentang UV-Vis-NIR untuk sinyal pengeksitasi dan Vis-NIR-MIR-FIR (*visible-near infrared-mid infrared-far-infrared*) untuk pengamatan absorpsi transien. Pada rentang pengamatan Vis-NIR terdapat teknik spektroskopi absorpsi transien yang dikenal pula sebagai teknik spektroskopi *flash photolysis*. Gambar 53a memaparkan teknik ini secara skematis, yang dilengkapi komponen penundaan dan *chopper* untuk pendeteksian tertunda bagi mode *pump-on/pump-off* secara sekuensial. Profil spektrum dan temporal bagi berbagai proses yang berkontribusi pada absorpsi transien dipaparkan secara detil pada Gambar 53b dan c (Gupta dan

Ozaki, 2020). Proses-proses tersebut mencakup absorpsi keadaan-tereksitasi – *Excited-state absorption* (ESA), proses pemutihan pada keadaan-dasar – *Ground-state bleach* (GSB), dan emisi terstimulasi – *Stimulated emission* (SE). Pada rentang pengamatan MIR atau infrared pada umumnya, teknik ini disebut sebagai spektroskopi absorpsi vibrasional terurai waktu (*time-resolved absorption vibrational spectroscopy*), yang memiliki dua jenis konfigurasi, yaitu konfigurasi berbasis spektrometer dispersive (Gambar 54a) dan konfigurasi berbasis interferometer (Gambar 54b) (Gupta dan Ozaki, 2020). Sedangkan pada rentang pengamatan FIR atau kadang disebut sebagai rentang terahertz, teknik ini dikenal sebagai spektroskopi terahertz domain-waktu dilengkapi *pump-probe* (*pump-probe time-domain terahertz spectroscopy*). Teknik ini menggunakan laser femtosecond sebagai pembangkit gelombang terahertz pada kedua antenna terahertz (*transmitter* dan *detector*) dan sebagai laser pengeksitasi lewat *harmonic generation unit* (Gambar 55). Pada *harmonic generation unit*, energi dari laser *femtosecond* yang umumnya berada pada rentang NIR dilipatgandakan hingga berada pada rentang sinar tampak atau bahkan UV.



Gambar 54 Skematis teknik spektroskopi absorpsi vibrasional terurai waktu (*time-resolved absorption vibrational spectroscopy*): (a) konfigurasi berbasis spektrometer dispersif dan (b) konfigurasi berbasis interferometer (Gupta dan Ozaki, 2020).



Gambar 55 Skematis teknik spektroskopi terahertz domain-waktu dilengkapi *pump-probe* (*pump-probe time-domain terahertz spectroscopy*) (Advantest, 2024).

9 PENUTUP

Penelitian di bidang spektroskopi molekul perlu terus dikembangkan untuk mengejar pesatnya perkembangan material maju yang semakin kompleks. Dalam beberapa dekade terakhir, kemajuan teknologi material telah melahirkan berbagai material baru dengan sifat-sifat yang unik dan aplikasi yang luas. Material-material ini, seperti nanomaterial, material komposit, dan material berbasis polimer, memiliki struktur yang sangat kompleks dan memerlukan teknik analisis yang canggih untuk memahaminya. Spektroskopi molekul mampu menerawang hingga tingkat atom dan molekul sehingga dapat memberikan informasi detail tentang struktur dan dinamika molekul. Spektroskopi molekul menjadi alat yang sangat penting yang tidak tergantikan dalam penelitian pengembangan material maju. Pengembangan teknik-teknik spektroskopi molekul yang lebih canggih dan akurat sangat diperlukan untuk mendukung penelitian material maju dan memastikan pemahaman yang mendalam tentang sifat-sifat material tersebut.

Pengembangan spektroskopi molekul mencakup semua teknik baik teknik spektroskopi optis maupun vibrasional. Spektroskopi optis, seperti spektroskopi UV-Vis dan spektroskopi fluoresensi, memungkinkan peneliti untuk mempelajari interaksi cahaya dengan materi dan mendapatkan informasi tentang struktur elektronik molekul. Di sisi lain, spektroskopi vibrasional, seperti spektroskopi absorpsi inframerah (IR) dan spektroskopi hamburan Raman, memberikan informasi tentang mode vibrasional molekul dan ikatan kimia. Kedua jenis teknik ini saling melengkapi dan memberikan gambaran yang komprehensif tentang sifat-sifat molekul. Dengan mengembangkan dan mengintegrasikan berbagai teknik spektroskopi ini, peneliti dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang struktur dan sifat-sifat material maju dan dapat dikembangkan pemanfaatannya secara lebih inovatif dalam berbagai aplikasi.

Kemandirian dalam teknologi di bidang spektroskopi molekul harus dimiliki oleh Indonesia dalam menguasai berbagai teknologi di masa depan. Mengingat pentingnya spektroskopi molekul dalam penelitian dan pengembangan teknologi, Indonesia perlu memiliki kemampuan untuk mengembangkan dan memanfaatkan teknologi ini secara mandiri. Hal ini akan memungkinkan Indonesia untuk tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga menjadi inovator yang mampu menciptakan solusi teknologi baru

yang sesuai dengan kebutuhan lokal dan nasional. Kemandirian teknologi ini juga akan mengurangi ketergantungan pada teknologi impor serta meningkatkan daya saing Indonesia di kancah internasional.

Perlu ditingkatkan kerja sama lintas bidang ilmu agar aplikasi spektroskopi molekul dapat diterapkan secara luas dan kemandirian dalam teknologinya dapat dicapai. Spektroskopi molekul tidak hanya relevan dalam bidang kimia dan fisika, tetapi juga memiliki aplikasi yang luas dalam bidang biologi, kedokteran, ilmu material, dan lingkungan. Oleh karena itu, kolaborasi antara para peneliti dari berbagai disiplin ilmu sangat penting dalam pengembangan aplikasi spektroskopi molekul yang inovatif dan efektif. Selain itu, kerja sama ini juga akan mempercepat transfer pengetahuan dan teknologi, serta meningkatkan kapasitas penelitian di Indonesia.

Berbagai *start-up* lokal/hibrid perlu untuk dikembangkan dalam memenuhi kebutuhan komponen pada pengembangan spektroskopi molekul secara mandiri. *Start-up* ini dapat berperan dalam memproduksi peralatan dan komponen spektroskopi yang berkualitas tinggi dan terjangkau, serta menyediakan layanan kalibrasi dan pemeliharaan peralatan. Dengan adanya *start-up* lokal yang kompeten, Indonesia juga dapat membangun suatu ekosistem teknologi yang mendukung pengembangan spektroskopi molekul secara berkelanjutan. Ekosistem ini secara bertahap akan mendukung berbagai ekosistem teknologi terkait, yang meliputi semua sektor. Selain itu, *start-up* ini juga dapat menjadi motor penggerak inovasi dan menciptakan lapangan kerja baru di bidang teknologi tinggi yang membutuhkan banyak pekerja berpendidikan tinggi. Hal ini akan memotivasi generasi muda untuk menempuh pendidikan tinggi, bukan hanya pada tingkat S-1, akan tetapi pada tingkat S-2 dan S-3.

Dengan demikian, pengembangan spektroskopi molekul di Indonesia memerlukan pendekatan yang komprehensif dan kolaboratif. Melalui penelitian yang terus-menerus, pengembangan teknik yang canggih, kemandirian teknologi, kerja sama lintas disiplin, dukungan dari *start-up lokal*, dan tentunya dukungan dari pemerintah dalam bentuk kebijakan dan finansial, kita semua dapat memanfaatkan potensi spektroskopi molekul dalam mengejar kemajuan teknologi serta meningkatkan daya saing di era globalisasi.

10 UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala nikmat dan rahmat-Nya yang telah dikaruniakan kepada saya untuk memperoleh amanah sebagai Guru Besar Institut Teknologi Bandung di Bidang Ilmu Spektroskopi Molekul Material Maju.

Ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya disampaikan kepada Pimpinan ITB, Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar, Senat Akademik dan Civitas Akademika Institut Teknologi Bandung yang atas kesempatan, kepercayaan dan dukungan yang diberikan dalam melaksanakan tugas di ITB sejak tahun 1999.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan pula kepada Dekanat, Senat dan kolega dosen, dan tenaga kependidikan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB, yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam proses pengajuan jabatan Guru Besar dari awal hingga akhir, dan juga kerja sama dan kekeluargaannya selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan pula kepada guru-guru kami sejak pendidikan dasar, sekolah menengah dan atas, yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu kepada saya, juga pembimbing penelitian saya selama studi sarjana, yaitu Prof. Cynthia Linaya Radiman dari Institut Teknologi Bandung, selama studi magister, Prof. Akihiko Tanioka dari Tokyo Institute of Technology, serta selama studi doktor, Prof. Pere Roca i Cabarrocas dari École polytechnique, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi yang sangat berharga dalam perjalanan penelitian saya. Juga tidak terlupa para wali selama menempuh studi sarjana, yaitu Prof. Zeily Nurachman dan Prof. Akhmaloka.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga disampaikan pula kepada para ketua prodi, rekan sejawat dosen, dan tendik di lingkungan Prodi Kimia atas segala bantuan, kebersamaan, dukungan, kekeluargaan dan suasana yang sangat menyenangkan selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga saya sampaikan pula kepada Prof. Cynthia Linaya Radiman, Prof. Djulia Onggo, Prof. I Made Arcana, Prof. Ismunandar, Dr. Bunbun Bundjali, Dr. Ing. Drs. H. Barnas Holil, DEA, Dr. Bambang Prijamboedi, M.Eng., Irma Mulyani, M.Si., Ph.D., Dr. I

Nyoman Marsih (alm.), Dr. rer. nat. Rino R. Mukti, Drs. Muhamad Abdulkadir Martoprawiro, M.S, Ph.D., Aep Patah, S.Si., M.Si., Ph.D., Mia Ledyastuti, S.Si., M.Si., Ph.D., Dr. Rachmawati, S.Si., M.Si., Dr. Erna Febriyanti, dan seluruh rekan sejawat Kelompok Keahlian Kimia Fisik dan Anorganik, yang telah memberikan ruang berkarya, memberikan semangat, dukungan dan menciptakan suasana kerja yang menyenangkan.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh kolega, rekan sejawat dan peneliti di Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, ITB, yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian bersama dan menggunakan fasilitasnya.

Ucapan terima kasih kepada Prof. Cynthia Linaya Radiman (FMIPA, ITB); Prof. Suprijadi (FMIPA, ITB); Prof. Hermawan K. Dipojono (FTI, ITB); Prof. Brian Yulianto (FTI, ITB), Prof. Sundani Nuroso Soewandhi (SF, ITB); Prof. Heri Hermansyah (Universitas Indonesia); Prof. Katsuyuki Fukutani (The University of Tokyo); Prof. Yutaka Majima (Tokyo Institute of Technology); Prof. Ikuyoshi Tomita (Tokyo Institute of Technology); dan Prof. Pere Roca i Cabarrocas (École polytechnique) yang telah memberikan rekomendasi untuk pengusulan guru besar saya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) ITB, Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), yang telah mendukung kami dalam melakukan penelitian ini.

Ucapan terima kasih kepada para guru, rekan-rekan dosen, dan peneliti, Prof. Yana Maolana Syah (alm.), Prof. Satria Bijaksana, Prof. Buchari, Prof. Sjamsul Arifin Achmad (alm.), Prof. Noer Mandsjoeriah Surdia (almh.), Prof. Tjia May On (alm.), Prof. Muhamad Bachri Amran, Dr. Mohammad Kemal Agusta, Prof. Fenny Martha Dwivany, Prof. Anggraini Barlian, Prof. Rachmat Hidayat, Prof. Sony Suhandono, Dr. Hendro, MS., Dr. Ciptati, M.S., M.Sc., Prof. Yogi Wibisono Budhi, Dr. Deana Wahyuningrum, S.Si., M.Si., Prof. Akhmad Herman Yuwono, Dikdik Sayahdikumullah, M.Sn., Ph.D, Prof. Alexander Agustinus P. Iskandar., Prof. Agustinus A. Nugroho, Prof. Pingkan Aditiawati, Achmad Rochliadi, M.S, Ph.D., Dr. rer. nat. Didin Mujahidin, S.Si., M.Si, Prof. Heni Rachmawati, Anita Alni, Ph.D., Dr. apt. Yuda Prasetya Nugraha, S.Farm., M.Si., Triati Dewi Kencana Wungu, S.Si., M.T, Ph.D., Dr.

Made Puspasari Widhiastuty, Dr. Damar Rastri Adhika, S.T., M.Sc., Dr. Eng. Nugraha, Prof. Hendra Gunawan, Dr. Hanni Garminia Y., S.Si., M.Si., Dr. Henry Setiyanto, Prof. Muhammad Ali Zulfikar, Prof. Rukman Hertadi, Prof. Wahyu Srigutomo, Prof. Ferry Iskandar, Prof. Dessy Natalia, Prof. Lia Dewi Juliawati, Prof. Fida Madayanti Warganegara, Dra. Rita Anggraini, M.Sc., Dra. Lubna Baradja, M.S., Dr. Alvanov Zpalanzani, M.M., Afriyanti Sumboja, Ph.D., Prof. Sidik Permana, Prof. Fatimah Arofiati Noor, Azzania Fibriani, M.Si., Ph.D., Arie Wibowo, Ph.D., Rindia Maharani Putri, Ph.D, Dr. Arfat Pradana, Dr. rer. nat. Freddy Haryanto, S.Si., M.Si., Dr. Rizkita Rachmi Esyanti, Dr. Dwinita Larasati, MA. dan rekan-rekan dosen dan peneliti lain yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu atas semua didikan, perhatian, dukungan, ide penelitian, diskusi, dan kerja samanya selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada Prof. I Made Arcana, atas bantuan dalam menelaah dan memberikan masukan terhadap buku orasi ini. Juga ucapan terima kasih kepada Dr. Nadiatus Silmi, dan seluruh mahasiswa bimbingan baik dari program S3, S2, dan S1 di lingkungan Laboratorium Kimia Fisik Material (LKFM) yang telah membantu dalam penyusunan buku ini.

Ucapan terima kasih kepada seluruh anggota dan alumni Laboratorium Kimia Fisik Material (LKFM) yang telah berdedikasi dan bekerja keras dalam membantu melakukan penelitian dan pengelolaan laboratorium selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan pula kepada kedua orang tua tercinta Ibu Tjje Soei Lan, Bapak Wim Effendi Kesuma Sumantri (alm.), dan mertua Ibu Herwilis dan Bapak Bartolomous Diaz, dan juga kepada Kakak Dr. rer. nat. Sparisoma Viridi, S.Si., Kakak ipar Mbak Inge, Tante Emily Sundari (almh.), Om Raden Santoso Imam Sujono Endropoetro (alm), Om Wismara Kesuma Sumantri (alm.), Tante Sutinawati (almh.), Om Adrianata Kusumah (alm.), Tante Darmawati (almh.), Tante Roselly Sumatri (almh), Om Ibrahim Rachmat (alm.), Tante Cynthia Puspa Kencana, Om Jumadi, Om Feby Armando, Tante Helmiyati, dan saudara-saudara kami keluarga besar Mardjoek dan Diaz, serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan, semangat dan doa untuk kami.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada istri tercinta, Dr. Phutri Milana, S.Pd., M.Si. yang selalu setia menemani dan memberikan dukungan penuh selama ini, sehingga menjadi sumber kekuatan dan inspirasi bagi saya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu namun telah memberikan kontribusi berarti dalam perjalanan ini.

Semoga Allah Swt. membalas berlipat ganda atas kebaikan yang telah diberikan. Amin ya robbal'alamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- 93 Years Ago Today, Sir CV Raman Changed How Indian Science Was Perceived. (28 Februari 2021): *Indiatimes*, diperoleh melalui situs internet: <https://www.indiatimes.com/technology/news/90-years-ago-today-sir-cv-raman-discovered-a-property-of-light-made-india-proud-in-the-world-340529.html>.
- A butterflys wings under a microscope* (t.t.): , diperoleh melalui situs internet: https://www.reddit.com/r/Damnthatsinteresting/comments/otshgr/a_butterflys_wings_under_a_microscope/.
- Advantest (2024): Terahertz Systems, diperoleh melalui situs internet: <https://www.advantest.com/en/products/scientific-equipment-medical-systems/terahertz-imaging/>.
- Anindita, P. A., Agson-Gani, P. A., Nugroho, F. G., Esyanti, R. R., Suendo, V., dan Dwivany, F. M. (2024): Nano-TiO₂ enhanced fruit storage chambers: unveiling the potential for prolonging banana shelf life, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/14620316.2024.2354778>
- Arulmozhi, N. (2007): Development of Non-Aqueous Asymmetric Hybrid Supercapacitors Based on Li-Ion Intercalated Compounds, Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3362.7286>
- Atkins, P., dan Paula, J. D. (2006): *Atkins' Physical Chemistry* (8 ed.), Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/hesc/9780198847816.001.0001>
- aurantiaca, S. (2012): *Michelson interferometer using white light*, diperoleh melalui situs internet: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Michelson_interferometer_using_white_light.png.
- Benu, D. P., Hardian, A., Mukti, R. R., Yulianto, B., Fukumitsu, N., Ide, Y., Yamauchi, Y., Kaneti, Y. V., dan Suendo, V. (2021): Reverse micelle-mediated synthesis of plate-assembled hierarchical three-dimensional flower-like gamma-alumina particles, *Microporous and Mesoporous Materials*, **321**, 111055. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111055>
- Berberan-Santos, M. N. (2001): Pioneering Contributions of Jean and Francis Perrin to Molecular Luminescence (Springer Series on Fluorescence), 7–33 dalam B. Valeur dan J.-C. Brochon, ed., *New Trends in Fluorescence Spectroscopy*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56853-4_2

- Cross, P. C., Burnham, J., dan Leighton, P. A. (1937): The Raman Spectrum and the Structure of Water, *Journal of the American Chemical Society*, **59**(6), 1134–1147. <https://doi.org/10.1021/ja01285a052>
- De Angelis, M. (2024): *Inverse micelle, illustration*, Science Photo Library, diperoleh melalui situs internet: <https://www.sciencephoto.com/media/827046/view>.
- De Oteyza, D. G., Gorman, P., Chen, Y.-C., Wickenburg, S., Riss, A., Mowbray, D. J., Etkin, G., Pedramrazi, Z., Tsai, H.-Z., Rubio, A., Crommie, M. F., dan Fischer, F. R. (2013): Direct Imaging of Covalent Bond Structure in Single-Molecule Chemical Reactions, *Science*, **340**(6139), 1434–1437. <https://doi.org/10.1126/science.1238187>
- Edinburgh Instruments (2024a): What are Absorption, Excitation and Emission Spectra?, diperoleh melalui situs internet: <https://www.edinst.com/blog/what-are-absorption-excitation-and-emission-spectra/>.
- Edinburgh Instruments (2024b): What is a Jablonski Diagram (Perrin-Jablonski Diagram)?, diperoleh melalui situs internet: <https://www.edinst.com/blog/jablonski-diagram-2/>.
- Edinburgh Instruments (2024c): What is Kasha's Rule?, diperoleh melalui situs internet: <https://www.edinst.com/blog/what-is-kashas-rule/>.
- Edinburgh Instruments (2024d): What is the Stokes Shift?, diperoleh melalui situs internet: <https://www.edinst.com/blog/what-is-the-stokes-shift/>.
- Febriyanti, E., Silmi, N., Suendo, V., Mukti, R. R., Vivitasari, P. U., Adhika, D. R., Majima, Y., Suprijadi, dan Ismunandar (2022): Thermodynamic Picture of Phase Segregation during the Formation of Bicontinuous Concentric Lamellar (*bcl*) Silica, *Langmuir*, **38**(4), 1368–1379. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02490>
- Febriyanti, E., Suendo, V., Mukti, R. R., Prasetyo, A., Arifin, A. F., Akbar, M. A., Triwahyono, S., Marsih, I. N., dan Ismunandar (2016): Further insight into the definite morphology and formation mechanism of mesoporous silica KCC-1, *Langmuir*, **32**(23), 5802–5811. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b00675>
- Gamo, F.-J., Sanz, L. M., Vidal, J., De Cozar, C., Alvarez, E., Lavandera, J.-L., Vanderwall, D. E., Green, D. V. S., Kumar, V., Hasan, S., Brown, J. R., Peishoff, C. E., Cardon, L. R., dan Garcia-Bustos, J. F. (2010): Thousands of chemical starting points for antimalarial lead identification, *Nature*, **465**(7296), 305–310. <https://doi.org/10.1038/nature09107>
- Gross, L., Mohn, F., Moll, N., Liljeroth, P., dan Meyer, G. (2009): The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy, *Science*, **325**(5944), 1110–1114. <https://doi.org/10.1126/science.1176210>

- Gupta, V. P., dan Ozaki, Y. (2020): *Molecular and Laser Spectroscopy Advances and Applications: Volume 2*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04226-7>
- IDEX Health & Science (10 Juni 2020): What optical filters should you consider for Raman Spectroscopy applications?, diperoleh melalui situs internet: <https://www.idex-hs.com/news-events/stories-and-features/detail/raman-spectroscopy-optical-filters>.
- IMPLEN (2024): UV-Vis Spectrophotometers, diperoleh melalui situs internet: <https://www.implen.de/uv-vis-spectrophotometer/>.
- Jafari, M. J. (November 2017): *Application of Vibrational Spectroscopy in Organic Electronics*, Thesis for Ph.D., Linköping University.
- John (2007): *Diesel spill on a road*, diperoleh melalui situs internet: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Dieselrainbow.jpg#metadata>.
- Lakowicz, J. R. (Ed.) (2006): *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4>
- Larkin, P. (2011): *Infrared and raman spectroscopy: principles and spectral interpretation*, Elsevier, Amsterdam ; Boston, 228.
- Lemonick, S. (18 Mei 2019): Chemical and biocatalysis in one pot, *Chemical & Engineering News*, diperoleh melalui situs internet: <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Chemical-biocatalysis-one-pot/97/i20>.
- Lewis, G. N., dan Kasha, M. (1944): Phosphorescence and the Triplet State, *Journal of the American Chemical Society*, **66**(12), 2100–2116. <https://doi.org/10.1021/ja01240a030>
- Long, D. A. (2002): *The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules* (1 ed.), Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470845767>
- Mayerhöfer, T. G., Pahlow, S., dan Popp, J. (2020): The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure, *ChemPhysChem*, **21**(18), 2029–2046. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000464>
- Milana, P., Suendo, V., Pebriani, T., Steky, F. V., Benu, D. P., Nurhayati, dan Radiman, C. L. (2021): Surface amplification of tetraphenylporphyrin overtone and combination Raman bands in drop coating deposition Raman (DCDR) on electrically conductive surfaces, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **23**(34), 18830–18842. <https://doi.org/10.1039/D1CP01911B>
- Mosca, S., Conti, C., Stone, N., dan Matousek, P. (2021): Spatially offset Raman spectroscopy, *Nature Reviews Methods Primers*, **1**(1), 21. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00019-0>
- Nugroho, F. G., Agson-Gani, P. A., Anindita, P. A., Steky, F. V., Benu, D. P., Yulianto, B., Dwivany, F. M., dan Suendo, V. (2024): Prolonging banana

- shelf life through visible light-induced ethylene scavenging using manganese-decorated TiO₂ via KMnO₄ reduction, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **691**, 133817. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133817>
- Nurhayati, Suendo, V., Alni, A., Nugroho, A. A., Majima, Y., Lee, S., Nugraha, Y. P., dan Uekusa, H. (2020): Revealing the Real Size of a Porphyrin Molecule with Quantum Confinement Probing via Temperature-Dependent Photoluminescence Spectroscopy, *The Journal of Physical Chemistry A*, **124**(13), 2672–2682. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c00665>
- Orera, V. M., dan Merino, R. I. (2015): Ceramics with photonic and optical applications, *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, **54**(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.02.002>
- PicoQuant (2024): Time-resolved Fluorescence, diperoleh melalui situs internet: <https://www.picoquant.com/applications/category/life-science/time-resolved-fluorescence#description>.
- Raman, C. V., dan Krishnan, K. S. (1928): The Negative Absorption of Radiation, *Nature*, **122**(3062), 12–13. <https://doi.org/10.1038/122012b0>
- Riss, A., Wickenburg, S., Gorman, P., Tan, L. Z., Tsai, H.-Z., De Oteyza, D. G., Chen, Y.-C., Bradley, A. J., Ugeda, M. M., Etkin, G., Louie, S. G., Fischer, F. R., dan Crommie, M. F. (2014): Local Electronic and Chemical Structure of Oligo-acetylene Derivatives Formed Through Radical Cyclizations at a Surface, *Nano Letters*, **14**(5), 2251–2255. <https://doi.org/10.1021/nl403791q>
- Rzhevskii, A. (2021): *Modern raman microscopy: technique and practice*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne, 378.
- Schmid, T., dan Dariz, P. (2019): Raman Microspectroscopic Imaging of Binder Remnants in Historical Mortars Reveals Processing Conditions, *Heritage*, **2**(2), 1662–1683. <https://doi.org/10.3390/heritage2020102>
- Shimadzu (2024): Characteristics of Single and Double Monochromator UV-VIS Spectrophotometers, diperoleh melalui situs internet: https://www.ssi.shimadzu.com/service-support/technical-support/analysis-basics/fundamentals-uv/single_double.html.
- Steky, F. V., Suendo, V., Mukti, R. R., Benu, D. P., Reza, M., Adhika, D. R., Tanuwijaya, V. V., dan Nugraha, A. B. (2019): bcl Morphology Formation Strategy on Nanostructured Titania via Alkaline Hydrothermal Treatment, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, **14**(3), 513. <https://doi.org/10.9767/bcrec.14.3.3853.513-520>
- Stokes, G. G. (1852): XXX. On the change of refrangibility of light, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **142**, 463–562. <https://doi.org/10.1098/rstl.1852.0022>

- Sun, Q. (2013): Local statistical interpretation for water structure, *Chemical Physics Letters*, **568–569**, 90–94. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2013.03.065>
- Sweetman, A. M., Jarvis, S. P., Sang, H., Lekkas, I., Rahe, P., Wang, Y., Wang, J., Champness, N. R., Kantorovich, L., dan Moriarty, P. (2014): Mapping the force field of a hydrogen-bonded assembly, *Nature Communications*, **5**(1), 3931. <https://doi.org/10.1038/ncomms4931>
- Valeur, B. (2001): *Molecular Fluorescence Principles and Applications*, *Molecular Fluorescence*.
- Valeur, B., dan Brochon, J.-C. (Ed.) (2001): *New Trends in Fluorescence Spectroscopy: Applications to Chemical and Life Sciences* (Springer Series on Fluorescence), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **1**. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56853-4>
- Western University (2024): *Physics: Absorption and transmission*, diperoleh melalui situs internet: <https://physics.uwo.ca/~cottam/MatSci%20notes-6A.pdf>.
- Williams, S. O., dan Imre, D. G. (1988): Raman spectroscopy: time-dependent pictures, *The Journal of Physical Chemistry*, **92**(12), 3363–3374. <https://doi.org/10.1021/j100323a012>
- Yusuf, M. O. (2023): Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, *Applied Sciences*, **13**(5), 3353. <https://doi.org/10.3390/app13053353>
- Zewail, A. H. (2000): Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond Using Ultrafast Lasers (Nobel Lecture), *Angewandte Chemie International Edition*, **39**(15), 2586–2631. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20000804\)39:15<2586::AID-ANIE2586>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20000804)39:15<2586::AID-ANIE2586>3.0.CO;2-O)
- Zieschang, F., MacNamara, K., Comerford, J., dan Grant, K. (3 Maret 2016): Time-resolved Measurements Using the Agilent Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer, Agilent Technologies.

CURRICULUM VITAE

Veinardi Suendo lulus sebagai Sarjana Sains (S.Si.) dalam bidang Kimia dari Institut Teknologi Bandung, Indonesia pada tahun 1998. Ia direkrut sebagai calon pegawai negeri sipil dan bekerja sebagai Asisten Ahli di Program Studi Kimia, Institut Teknologi Bandung pada tahun 1999. Veinardi memperoleh gelar M.Eng. dari *Department of Organic and Polymeric Materials*, Tokyo Institute of Technology, Jepang, pada tahun 2001. Ia bekerja di bawah bimbingan Prof. Akihiko Tanioka mempelajari transpor ion melalui membran bermuatan serta fenomena elektro-kinetik terkait. Setelah lulus dari Tokyo Institute of Technology, Veinardi pindah ke Prancis untuk mengejar gelar Ph.D. di *Ecole Polytechnique*, Palaiseau. Pada tahun 2005, ia menyelesaikan Ph.D.-nya di *Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces*, Ecole Polytechnique, Departemen Fisika, di bawah bimbingan Prof. Pere Roca i Cabarrocas. Selama di Prancis, Veinardi mempelajari aspek fisikokimia pada deposisi plasma nanokristal silikon, dengan fokus pada spektroskopi fotoluminesensi dan aplikasi fotonik dari material yang dikembangkan, yaitu nanokristal silikon. Setelah kembali ke Institut Teknologi Bandung pada tahun 2006, ia memulai karier akademis barunya di Program Studi Kimia, di mana ia dipromosikan menjadi Lektor pada tahun 2008. Pada tahun 2013, Veinardi memulai babak baru sebagai ilmuwan independen ketika ia dipromosikan menjadi Lektor Kepala. Sepuluh tahun kemudian, pada tahun 2023, Veinardi dipromosikan menjadi Guru Besar dalam bidang Spektroskopi Molekuler Material Maju. Minat penelitiannya berfokus pada pengembangan material fungsional baru berstruktur nano, termasuk material elektronik organik (porfirin, antosianin, polianilin...), nanokarbon, dan material mesopori (silika *bcl*, nanosilika, nanoalumina, zeolit...). Ini mencakup sifat optoelektronik, rute dan mekanisme sintesis, modifikasi kimia, proses plasma, fabrikasi devais, proses larutan, dan spektroskopi molekuler (Raman, IR, UV-Vis-NIR, dan fotoluminesensi).



Nama : Veinardi Suendo
 Tempat/tgl lahir : Jakarta, 7 November 1975
 Kel. Keahlian : Kimia Anorganik dan Fisik
 Alamat Kantor : Jl. Ganesha No. 10 Bandung
 Nama Istri : Phutri Milana

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun Lulus	Gelar	Bidang
1.	S1	Institut Teknologi Bandung, Indonesia	1998	S.Si.	Kimia
2.	S2	Tokyo Institute of Technology, Jepang	2001	M.Eng.	Teknik Material
3.	S3	Ecole Polytechnique, Prancis	2005	Dr.	Fisika

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1.	Kepala Laboratium Kimia Fisik	2007–2017
2.	Ketua Kelompok Keahlian Kimia Anorganik dan Fisik	2023–sekarang
3.	Direktur Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi	2023–sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

No.	Pangkat	Golongan	TMT
1.	Penata	III/c	01-08-2008
2.	Penata Tingkat I	III/d	01-04-2014
3.	Pembina	IV/a	01-04-2016
4.	Pembina Tingkat I	IV/b	01-04-2024

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

No.	Nama Jabatan	TMT
1.	Lektor	01-10-2008
2.	Lektor Kepala	01-10-2013
3.	Profesor/Guru Besar	01-08-2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

No.	Judul Penelitian	Tahun/periode; Sumber dana
1.	Sintesis Tanpa Pelarut Ligan <i>Tetraphenylporphyrin</i> dan Senyawa Kompleksnya dengan Berbagai Logam Blok-d dengan Bantuan Radiasi <i>Microwave</i> Sebagai <i>Light Harvesting Agent</i> pada Aplikasi Sel Surya	2012-2013; Kemdikbudristek
2.	Studi Korelasi Struktur Lokal Terhadap Sifat Magnetoelektrik Pada Material Organik Terkonjugasi Menggunakan Spektroskopi Raman	2015-2016; Kemdikbudristek
3.	Teknik Tandem Pirolisis – Polimerisasi Plasma Terkatalitik untuk Produksi Efisien Bahan Bakar Cair Berkualitas Tinggi Dari Limbah Kelapa Sawit	2016-2017; Kemdikbudristek
4.	Material Komposit Grafena/Polianilin Teraktivasi Zeolit <i>Supercage</i> Faujasit Sebagai Elektroda Lawan Pada DSSC	2018-2020; Kemdikbudristek
5.	Perilaku Nanofluidik Molekul Diatomik dalam Saluran-Nano pada Material Bermorfologi <i>Bicontinuous Concentric Lamellar (bcl)</i> sebagai Acuan Kinetika Transpor pada Proses Katalisis	2017-2018; Kemdikbudristek
6.	Studi Mekanisme dan Jalur Pembentukan Partikel Berstruktur Nano <i>Bicontinuous Concentric Lamellar</i> sebagai Acuan Sintesis Material Oksida Fungsional	2018-2019; Kemdikbudristek
7.	Aplikasi Partikel Berstruktur <i>bcl</i> pada antar muka plasma/air dalam Reaksi Oksidasi Parsial Metana Menggunakan Reaktor Plasma Gelombang Mikro Surfatron Bertipe Obor	2018-2020; Kemdikbudristek
8.	<i>Methane To Methanol Transformation by bcl Particles Enhanced Microwave Plasma Torch</i>	2019; Osaka Gas Foundation of International Cultural Exchange (OGFICE)
9.	Kontrol Bidang Muka Kristal ZnO dan Modifikasi Permukaannya untuk Aplikasi Fotoanoda pada <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC)	2020-2021; Kemdikbudristek
10.	Studi Mekanisme dan Jalur Pembentukan Partikel Berstruktur Nano <i>Bicontinuous Concentric Lamellar</i> Secara Termodinamika dan Spektroskopi	2020-2022; Kemdikbudristek
11.	Komposit PANI/rGO Terdekorasi Nanokluster MnO ₂ sebagai Elektroda Lawan Bebas Platina pada <i>Dye-Sensitized Solar Cell</i> (DSSC)	2021-2022; Kemdikbudristek
12.	Sintesis Hidrotermal TiO ₂ Terdekorasi Mn, Co, dan Ni dengan morfologi <i>bicontinuous concentric lamellar (bcl)</i> tanpa agen pengarah struktur	2021; Institut Teknologi Bandung
13.	Sintesis TiO ₂ Hitam Terdoping Logam Transisi dengan Metode Plasma <i>Microwave</i> sebagai Fotoanoda pada Sel Surya Berjenis Fotoelektrokimia	2021; Institut Teknologi Bandung
14.	Sintesis Fotokatalis TiO ₂ Nanostruktur Bermorfologi <i>bcl</i> Terdekorasi Logam Transisi Deret Pertama	2022; Institut Teknologi Bandung

No.	Judul Penelitian	Tahun/periode; Sumber dana
15.	Sintesis ZnO Berstruktur Nano pada Sistem Air/Etilen Glikol Termediasi Surfaktan untuk Aplikasi Fotoanoda pada <i>Dye Sensitized Solar Cells</i> (DSSC)	2022; Institut Teknologi Bandung
16.	Pembuatan Film Komposit PANI-nanorod/EEG sebagai Elektroda Lawan untuk Aplikasi <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> Berefisiensi Tinggi	2021-2023; Kemdikbudristek
17.	Pengembangan Material Fotokatalis Berbasis Silika Mesopori Bermorfologi <i>Bicontinuous Concentric Lamellar (bcl)</i> Terdekorasi Titania	2023; Institut Teknologi Bandung
18.	Remediasi Fotokimia Lingkungan Terpolusi menggunakan Fotokatalis Titania Berstruktur Nano	2023-2024; LPDP-BRIN
19.	Sintesis Silika Mesopori Bermorfologi <i>bicontinuous concentric lamellar (bcl)</i> yang Mudah dan Ekonomis sebagai Material Penyangga Katalis dan Penghantar Obat	2024; Kemdikbudristek
20.	Pengaruh Interaksi Permukaan Komposit PANI/Grafit sebagai Elektrode lawan dalam Peningkatan Kinerja DSSC Bebas Platina	2024; Institut Teknologi Bandung

VI. PUBLIKASI

A. BUKU

1. Sumampouw, G. A., Indarto, A., **Suendo, V.**, Azis, M. M., Chemical and Biochemical Process Involved in the Degradation of Hazardous Contaminants through Bio and Nanoremediation, in *Bio and Nanoremediation of Hazardous Environmental Pollutants*, 1st Edition, CRC Press, Boca Raton, 256–282 (2023) eISBN 9781003052982.

B. JURNAL

1. **Suendo, V.**, Eto, R., Osaki, T., Higa, M., & Tanioka, A. (2001). (2001), Ionic environmental effect on the time-dependent characteristics of membrane potential in a bipolar membrane, *J. Colloid Interface Sci.*, 240,162.
2. Radiman, C. L., Yuliany and **Suendo, V.** (2002), Effects of soaking medium on the polysulfone permeability, *Journal of Mathematics and Sciences* 7(2), 77 (in Indonesian). ISSN 0854-5154.
3. **Suendo, V.**, Minagawa, M., & Tanioka, A. (2002), Membrane potential of a bipolar membrane: the effect of concentration perturbation of the intermediate phase around a certain value, *J. Electroanal. Chem.*, 520, 29.

4. **Suendo, V.**, Eto, R., & Tanioka, A. (2002), Ionic rectification properties of a bipolar interface consisting of a cationic surfactant and cation-exchange membrane, *J. Colloid Interface Sci.*, 250, 507.
5. **Suendo, V.**, Minagawa, M., & Tanioka, A. (2002), Bipolar interface formation of cationic surfactant on the surface of a cation-exchange membrane: current-voltage characteristics in aqueous electrolyte solution, *Langmuir* 18, 6266.
6. Kharchenko, A. V., **Suendo, V.**, & i Cabarrocas, P. R. (2003), Plasma studies under polymorphous silicon deposition conditions, *Thin Solid Films* 427, 236.
7. Saadane, O., Lebib, S., Kharchenko, A. V., **Suendo, V.**, Longeaud, C., & i Cabarrocas, P. R. (2003), Helium versus hydrogen dilution of silane in the deposition of polymorphous silicon films: Effects on the structure and the transport properties, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 762, A5.1.
8. Tripathi, V., Mohapatra, Y. N., **Suendo, V.**, & i Cabarrocas, P. R. (2003), Size distribution of embedded nano-crystallites in polymorphous silicon studied by Raman spectroscopy and photoluminescence, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 762, A19.7.
9. **Suendo, V.**, Kharchenko, A. V., & i Cabarrocas, P. R. (2004), The effects of RF plasma excitation frequency and doping gas on the deposition of polymorphous silicon thin films, *Thin Solid Films* 451-452, 259.
10. Kharchenko, A. V., **Suendo, V.**, Daineka, D., & Roca i Cabarrocas, P. (2004), Effect of dopants on the dynamics of powder formation and the properties of polymorphous silicon thin films, *Materials Science Forum* 455-456, 536.
11. Tchakarov, S., Das, D., Saadane, O., Kharchenko, A. V., **Suendo, V.**, Kail, F., & i Cabarrocas, P. R. (2004), Helium versus hydrogen dilution in the optimization of polymorphous silicon solar cells, *J. Non-Cryst. Solids* 338-340, 668.
12. Daineka, D., **Suendo, V.**, & i Cabarrocas, P. R. (2004), Temperature dependence of the optical functions of amorphous silicon-based materials: application to in situ temperature measurements by spectroscopic ellipsometry, *Thin Solid Films* 468, 298.

13. **Suendo, V.**, Patriarche, G., & i Cabarrocas, P. R. (2005), Luminescence of polymorphous silicon carbon alloys, *Optical Materials* 27, 953.
14. Nguyen-Tran, T., **Suendo, V.**, & Roca i Cabarrocas, P. ((2005), Optical study of disorder and defects in hydrogenated amorphous silicon carbon alloys, *Applied Physics Letter* 87, 011903.
15. **Suendo, V.**, Patriarche, G., & i Cabarrocas, P. R. (2006), Influence of deposition parameters and post-deposition plasma treatments on the photoluminescence of polymorphous silicon carbon alloys, *J. Non-Cryst. Solids* 352, 1357.
16. **Suendo, V.**, & i Cabarrocas, P. R. (2006), Plasma diagnostics in silane-methane-hydrogen plasmas under pm-Si_{1-x}C_x:H deposition conditions, *J. Non-Cryst. Solids* 352, 959.
17. Chaâbane, N., **Suendo, V.**, Vach, H., & Roca i Cabarrocas, P. (2006), Soft-landing of silicon nanocrystals in plasma enhanced chemical vapor deposition, *Applied Physics Letter* 88, 203111.
18. Nguyen-Tran, T., **Suendo, V.**, Roca i Cabarrocas, P., Nittala, L. N., Bogle, S. N., & Abelson, J. R. (2006), Fluctuation microscopy evidence for enhanced nanoscale structural order in polymorphous silicon thin films, *Journal of Applied Physics* 100, 094319.
19. Tajuddin, M. N., Novitrianc, N., Viridi, S., Sustini, E., & **Suendo, V.** (2009), Damped Zigzag Upward Motion of a Ball in Fluid: a Numerical Model, *Indonesian Journal of Physics* 20 (1), 13-16.
20. **Suendo, V.**, & Viridi, S. (2010), Algorithms to Produce Discreet Gaussian Sequences, *Jurnal Pengajaran Fisika Sekolah Menengah* 2 (2), 19-23.
21. Wang, J., **Suendo, V.**, Abramov, A., Yu, L., & Roca i Cabarrocas, P. (2010), Strongly enhanced tunable photoluminescence in polymorphous silicon carbon thin films via excitation-transfer mechanism, *Applied Physics Letter* 97, 221113.
22. Ramadhan, L. O. A. N., Radiman, C. L., Wahyuningrum, D., **Suendo, V.**, Ahmad, L. O., & Valiyaveetiil, S. (2010), Deasetilasi Kitin secara Bertahap dan Pengaruhnya terhadap Derajat Deasetilasi serta Massa molekul Kitosan, *Jurnal Kimia Indonesia* 5(1), 17-21.

23. Piluharto, B., **Suendo, V.**, Ciptati, T., & Radiman, C. L. (2011), Strong correlation between membrane effective fixed-charge and proton conductivity in the sulfonated polysulfone cation-exchange membranes, *Ionics* 17, 229–238.
24. Nurhayati, N., & **Suendo, V.** (2011), Isolation of Chlorophyll a from Spinach Leaves and Modification of Center Ion with Zn^{2+} : Study on its Optical Stability, *Jurnal Matematika & Sains* 16 (2) 65-70.
25. Aprilia, A., **Suendo, V.**, Herman, Wulandari, P., Hidayat, R., Fujii, A., & Ozaki, M. (2011), Influences of aluminum concentration to the characteristics of ZnO electron transport layer and its hybrid polymer solar cell, *AIP Conf. Proc.* 1454, 223-226.
26. **Suendo, V.**, & Viridi, S. (2012), Ab initio calculation of UV-Vis absorption spectra of a single molecule chlorophyll a: Comparison study between RHF/CIS, TDDFT, and Semi-empirical Methods, *ITB J. Sci.* 44A (2), 93-112.
27. **Suendo, V.**, Minagawa, M., & Tanioka, A. (2012), Chronopotentiometry study of a cation-exchange membrane in the presence of cationic surfactant in membrane surface vicinity, *Ionics* 18, 159-166.
28. Ramadhan, L. O. A. N., Radiman, C. L., **Suendo, V.**, Wahyuningrum, D., & Valiyaveetil, S. (2012), Synthesis and Characterization of Polyelectrolyte Complex N-Succinylchitosan-chitosan for Proton Exchange Membrane, *Procedia Chemistry* 4, 114-122.
29. Syari'ati, A., & **Suendo, V.** (2013), Effect of Electrochemical Reaction Environment on the Surface Morphology and Photoluminescence of Porous Silicon, *Materials Science Forum* 737, 60-66.
30. Aprilia, A., Wulandari, P., **Suendo, V.**, Hidayat, R., Fujii, A., & Ozaki, M. (2013), Influences of dopant concentration in sol-gel derived AZO layer on the performance of P3HT:PCBM based inverted solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 111, 181–188.
31. Courtois, G., Chatterjee, P., **Suendo, V.**, Salomon, A., & Cabarrocas, P. R. (2013) Investigation of silicon heterojunction solar cells by photoluminescence under DC-bias, *The European Physical Journal: Photovoltaics*, 4, 45106.

32. Hardian, A., Choi, G. M., **Suendo, V.**, & Ismunandar. (2014), Structure and Ionics Conductivity of Codoped Ceria for IT-SOFC Electrolytes, *Journal of The Australian Ceramics Society* 50(2), 99-109.
33. Wahyuningrum, D., Zulqarnaen, M., & **Suendo, V.** (2014), The Synthesis and Characterization of 7-Hydroxy-4-Methylcoumarin and the Investigation of the Fluorescence Properties of Its 7-Hydroxy-4-Methylcoumarin-Chitosan Films, *AIP Conf. Proc.* 1589, 169-173.
34. Prima, E. C., Yulianto, B., **Suendo, V.**, & Suyatman. (2014), Improving Photochemical Properties of *Ipomea pescaprae*, *Imperata cylindrica* (L.) Beauv, and *Paspalum conjugatum* Berg as Photosensitizers for Dye Sensitized Solar Cells, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 25, 4603-4611.
35. Prasetyo, A., Mihailova, B., **Suendo, V.**, Nugroho, A. A., & Ismunandar, I. (2015), Futher Insights into The Structural Transformations in $\text{PbBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ Revealed by Raman Spectroscopy, *Journal of Applied Physics* 117, 064102.
36. Jaafar, N. F., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Efendi, J., Mukti, R. R., Jusoh, R., Jusoh, N. W. C., Karim A. H., Salleh N. F. M., & **Suendo, V.** (2015), Direct in situ activation of Ag^0 nanoparticles in synthesis of Ag/TiO_2 and its photoactivity, *Applied Surface Science* 338, 75-84.
37. Setiadi, H., Prasetyo, A., **Suendo, V.**, & Nugroho, A. A. (2015), Phonon Properties of $\text{Co}:\text{TiO}_2$ single crystal, *Materials Science Forum* 827, 360-365.
38. Rachmawati, H., Haryadi, B. M., Anggadiredja, K., & **Suendo, V.** (2015), Intraoral Film Containing Insulin-Phospholipid Microemulsion: Formulation and In Vivo Hypoglycemic Activity Study, *AAPS PharmaSciTech* 16, 692-703.
39. Nurachman, Z., Hartini, H., Rahmaniyah, W. R., Kurnia, D., Hidayat, R., Prijamboedi, B., **Suendo, V.**, Ratnaningsih, E., Panggabean, L. M. G. & Nurbaiti, S. (2015), Tropical Marine *Chlorella* sp. PP1 As A Source Of Photosynthetic Pigments For Dye-Sensitized Solar Cells, *Algal Research* 10, 25-32.
40. Febriyanti, E., Suendo, V., Mukti, R. R., Prasetyo, A., Arifin, A. F., Akbar, M. A., Triwahyono, S., Marsih, I. N. & Ismunandar. (2016),

- Further Insight into the Definite Morphology and Formation Mechanism of Mesoporous Silica KCC-1, *Langmuir* 32, 5802-5811.
41. Rahma, A., Munir, M. M., Prasetyo, A., **Suendo, V.**, & Rachmawati, H. (2016), Intermolecular Interactions and the Release Pattern of Electrospun Curcumin-Polyvinylpyrrolidone Fiber, *Biol. Pharm. Bull.* 39, 163-173.
 42. Hamid, M. Y. S., Firmansyah, M. L., Triwahyono, S., Jalil, A. A., Mukti, R. R., Febriyanti, E., **Suendo, V.**, Setiabudi, H. D., Mohamed, M. & Nabgan, W. (2017) Oxygen vacancy-rich mesoporous silica KCC-1 for CO₂ methanation. *Appl. Catal. A: General*, 532, 86-94.
 43. Jatmoko, K.D., Prasetyo, A., **Suendo, V.**, Nakatsuji, S., Nugroho, A.A. (2017) Temperature Dependent Raman Studies of Pr₂Zr₂O₇ Single Crystal, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 196, 1, 012051 1-4.
 44. Prasetyo, A., Mihailova, B., **Suendo, V.**, Nugroho, A.A., Zulhadjri, Ismunandar, (2017) Raman scattering study of the effect of A- and B-site substitution on the room-temperature structure of ABi₄Ti₄O₁₅, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 196, 1, 012041 1-4.
 45. Hamid, M.Y.S., Firmansyah, M.L., Triwahyono, S., Jalil, A.A., Mukti, R.R., Febriyanti, E., **Suendo, V.**, Setiabudi, H.D., Mohamed, M., Nabgan, W. (2017) Oxygen vacancy-rich mesoporous silica KCC-1 for CO₂ methanation, *Applied Catalysis A: General*, 532, 86-94.
 46. Prasetyo, A., Mihailova, B., **Suendo, V.**, Nugroho, A.A., Zulhadjri, Ismunandar, (2017) Structural transformations in Pb_{1-x}Bi₄+xTi₄-xMnxO₁₅ (x = 0.2 and 0.4): a Raman scattering study, *Journal of Raman Spectroscopy*, 48, 2, 292-297.
 47. Kadja, G.T.M., Fabiani, V.A., Aziz, M.H., Fajar, A.T.N., Prasetyo, A., **Suendo, V.**, Ng, E.-P., Mukti, R.R., (2017) The effect of structural properties of natural silica precursors in the mesopore-free synthesis of hierarchical ZSM-5 below 100 °C, *Advanced Powder Technology*, 28, 2, 443-452.
 48. Lustriane, C., Dwivany, F. M., **Suendo, V.**, Reza, M., (2018) Effect of chitosan and chitosan-nanoparticles on post harvest quality of banana fruits, *Journal of Plant Biotechnology*, 45, 1, 36-44.

49. Akbar, S. A., Rochliadi, A., **Suendo, V.**, Saidi, N., Lelifajri, and Mardhiah, A., (2018) A Raman Spectroscopy Study of the Polyaniline Electrode on Zn-Polyaniline Rechargeable Batteries, *Rasayan Journal of Chemistry*, 11, 4, 1525–1531.
50. Rahmawati, R., **Suendo, V.**, and Hidayat, R., (2018) Reduced Graphene Oxide/Polyaniline Nanocomposite as Efficient Counter Electrode for Dye Sensitized Solar Cells, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 384, conference 1, 012040 1–8.
51. Alam F. C., Sembiring E., Muntalif B. S., and **Suendo, V.**, (2019) Microplastic distribution in surface water and sediment river around slum and industrial area (case study: Ciwalengke River, Majalaya district, Indonesia), *Chemosphere*, 224, 637–645.
52. Wardani, M. K., Kadja, G. T. M., Fajar, A. T. N., Subagjo, Makertihartha, I. G. B. N., Gunawan, M. L., **Suendo, V.**, and Mukti, R. R., (2019) Highly crystalline mesoporous SSZ-13 zeolite obtained via controlled post-synthetic treatment", *RSC Advances*, 9, 77–86.
53. Kharchenko, A. V., Ouaras, K., **Suendo, V.**, Ebothé, J., and P. Roca i Cabarrocas, (2019) Influence of p- and n-type doping gases on nonparticle formation in SiH₄/H₂ radiofrequency plasma discharges used for polymorphous silicon thin film deposition, *Journal of Applied Physics*, 125, 163307-1–163307-8.
54. Amalina, A., N., **Suendo, V.**, Reza, M., Milana, P., Sunarya, R. R., Adhika, D. R., Tanuwijaya, V. V., (2019) Preparation of Polyaniline Emeraldine Salt for Conducting-Polymer-Activated Counter Electrode in Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) using Rapid-Mixing Polymerization at Various Temperature, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14, 3, 521–528.
55. Benu, D. P., **Suendo, V.**, Mukti, R. R., Febriyanti, E., Steky, F. V., Adhika, D. R., Tanuwijaya, V. V., Nugraha, A. B. (2019) Synthesis of Spherical Nanostructured γ -Al₂O₃ Particles using Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) Reverse Micelle Templating, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14, 3, 542–550.
56. Steky, F. V., **Suendo, V.**, Mukti, R. R., Benu, D. P., Reza, M., Adhika, D. R., Tanuwijaya, V. V., Nugraha, A. B., (2019) bcl Morphology Formation Strategy on Nanostructured Titania via

- Alkaline Hydrothermal Treatment, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14, 3, 513–520.
57. Wardhana, Y. W., Soewandhi, S. N., Wikarsa, S., **Suendo, V.** Polymorphic properties and dissolution profile of efavirenz due to solvents recrystallization, (2019) *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 32, 3, 981–986.
 58. Wendari, T. P., Arief, S., Mufti, N., **Suendo, V.**, Prasetyo, A., Ismunandar, Baas, J., Blake, G. R., Zulhadjri, (2019) Synthesis, structural analysis and dielectric properties of the double-layer Aurivilius compound $Pb_{1-2x}Bi_{1,5+2x}La_{0,5}Nb_{2-x}Mn_xO_9$, *Ceramics International*, 45, 14, 17276–17282.
 59. Anwari, S., Aini, N., Hardian, A., **Suendo, V.**, Prasetyo, A., (2019) The Effect of Temperature to CTAB-assisted Solvothermal Synthesis of TiO_2 , *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 546, 042003 1–8.
 60. Reza, M., Srikandi, N., Amalina, A. N., Benu, D. P., Steky, F. V., Rochliadi, A., **Suendo, V.**, Variation of Ammonium Persulfate Concentration Determines Particle Morphology and Electrical Conductivity in HCl Doped Polyaniline, (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 599, Number 1, 012002 1–7.
 61. Purwalaksana, A. Z., **Suendo, V.**, Yulianto, B., Hendro, (2019), Designing A Low-Cost Surface Plasmon Resonance (SPR) Instrument for Monitoring Degradation of Milk Quality, *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 1245, 012072 1–7.
 62. Dwivany, F. M., Esyanti, R. R., **Suendo, V.**, Pratiwi, A. S., & Putri, A. A.; (2019); Analysis of ethylene biosynthesis gene expression profile during titaniumdioxide (TiO_2) treatment to develop a new banana postharvest technology; *Indonesian Journal of Biotechnology*, 24, 2, 88-92.
 63. Aini, N., Chasanah, S. N., Khalifah, S. N., Arifah, A., Prasetyo, A., & **Suendo, V.** (2019), Preparation and Properties of $Ti_{0,997}V_{0,003}O_2$ Photocatalyst Supported on Indonesian Natural Zeolite Using Sonochemical Method, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 622, 1, 012006 1-8.
 64. Setianto, A. B., Nugraha, Y. P., **Suendo, V.**, Ainurofiq, A., Uekusa, H., dan Soewandhi, S. N. (2020): X-ray diffraction and vibrational

spectroscopic studies of the intermolecular interactions on the grinding and compaction behaviours of lopinavir and ritonavir crystals, *Acta Poloniae Pharmaceutica - Drug Research*, 77(2), 259–269.

65. Kadja, G. T. M., Kadir, I. R., Fajar, A. T. N., **Suendo, V.**, dan Mukti, R. R. (2020): Revisiting the seed-assisted synthesis of zeolites without organic structure-directing agents: insights from the CHA case, *RSC Advances*, 10(9), 5304–5315.
66. Rahmawati, F., Kusumaningtyas, A. A., Saraswati, T. E., Prasetyo, A., dan **Suendo, V.** (2020): Mn-doped NaFeO₂ from a low purity-Fe precursor and its performance as cathode for Sodium-Ion Battery, *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 1–8.
67. Prasetyo, A., Mihailova, B., **Suendo, V.**, Nugroho, A. A., dan Ismunandar (2020): The effect of the A-Site cation on the structural transformations in A₂Bi₄Ti₄O₁₅ (A= Ba, Sr): Raman scattering studies, *Journal of Solid State Chemistry*, 283, 121131, 1-6.
68. Wardhana, Y. W., Hardian, A., Chaerunisa, A. Y., **Suendo, V.**, dan Soewandhi, S. N. (2020): Kinetic estimation of solid state transition during isothermal and grinding processes among efavirenz polymorphs, *Heliyon*, 6(5), e03876.
69. Reza, M., Steky, F. V., & **Suendo, V.**; (2020) Effect of Acid Doping on Junction Characteristics of ITO/Polyaniline/N719/Ag Diode; *Journal of Electronics Materials* 49, 1835-1840.
70. Prakoso, B., Ma, Y., Stephanie, R., Hawari, N. H., **Suendo, V.**, Judawisastra, H., Zong, Y., Liu, Z., dan Sumboja, A. (2020): Facile synthesis of battery waste-derived graphene for transparent and conductive film application by an electrochemical exfoliation method, *RSC Advances*, 10(17), 10322–10328.
71. Nurhayati, **Suendo, V.**, Alni, A., Nugroho, A. A., Majima, Y., Lee, S., Nugraha, Y. P., dan Uekusa, H. (2020): Revealing the Real Size of a Porphyrin Molecule with Quantum Confinement Probing via Temperature-Dependent Photoluminescence Spectroscopy, *The Journal of Physical Chemistry A*, 124(13), 2672–2682.
72. Sunarya, R. R., Hidayat, R., Radiman, C. L., dan **Suendo, V.** (2020): Electrocatalytic Activation of a DSSC Graphite Composite Counter Electrode Using In Situ Polymerization of Aniline in a

- Water/Ethanol Dispersion of Reduced Graphene Oxide, *Journal of Electronic Materials*, 49(5), 3182–3190.
73. Milana, P., Nurhayati, Steky, F. V., Ando, Y., Simanullang, M., Sugiyama, M., Radiman, C. L., dan **Suendo, V.** (2020): Effect of Anchoring Groups on Electron Transfer at Porphyrins-TiO₂ Interfaces in Dye-Sensitized Solar Cell Application, *Macromolecular Symposia*, 391(1), 1900126.
 74. Nurhayati, **Suendo, V.**, Nugroho, A. A., dan Alni, A. (2020): Temperature-dependent photoluminescence of H₂TPP and ZnTPP thin films on Si substrates, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 858, 012036.
 75. Fatya, A. I., Reza, M., Sunarya, R. R., dan **Suendo, V.** (2020): Synthesis of polyaniline/electrochemically exfoliated graphene composite as counter-electrode in dye-sensitized solar cell, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(12), 1370–1378.
 76. Sembiring, E., Fareza, A. A., **Suendo, V.**, dan Reza, M. (2020): The Presence of Microplastics in Water, Sediment, and Milkfish (*Chanos chanos*) at the Downstream Area of Citarum River, Indonesia, *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(7), 355.
 77. Megantari, V., Febriyanti, E., Benu, D. P., Reza, M., Steky, F. V., Yulianto, B., Mukti, R. R., dan **Suendo, V.** (2020): Nanofluidic behavior of diatomic molecules in bicontinuous concentric lamellar (bcl) silica formed by polysiloxane sol-gel phase segregation as a reference in the mass transport through the open channel system, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(12), 1359–1369.
 78. Abrori, S. A., Septiani, N. L. W., Anshori, I., **Suendo, V.**, Yulianto, B. (2020): Metal-Organic-Framework FeBDC-Derived Fe₃O₄ for Non-Enzymatic Electrochemical Detection of Glucose. *Sensors*, 20(17), 4891.
 79. Utami, A. N., Reza, M., Benu, D. P., Fatya, A. I., Yulianto, B., dan **Suendo, V.** (2020): Reverse micelle facilitated synthesis of nanostructured polyaniline as the counter electrode materials in dye-sensitized solar cells, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(12), 1350–1358.
 80. Rachmat, D., Paramudita, I., Fadhillah, N., Haekal, M. H., Wahyuono, R. A., Hidayat, R., Zakaria, R., **Suendo, V.**, Risanti, D.

- D. (2021): Au-doped mesoporous SiO₂ scattering layer enhances light harvesting in quasi Solid-State dye-sensitized solar cells. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.
81. **Suendo, V.**, Lau, Y., Hidayat, F., Reza, M., Qadafi, A., Rochliadi, A. (2021): Effect of face-to-face and side-to-side interchain interactions on the electron transport in emeraldine salt polyaniline. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(12), 7190-7199.
 82. Benu, D. P., Earnshaw, J., Ashok, A., Tsuchiya, K., Saptiama, I., Yuliarto, B., **Suendo, V.**, Mukti R. R., Fukumitsu N., Ariga K., Kaneti Y.V., & Yamauchi, Y. (2021): Mesoporous Alumina-Titania Composites with Enhanced Molybdenum Adsorption towards Medical Radioisotope Production. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 94(2), 502-507.
 83. Oktavia, L., Mulyani, I., **Suendo, V.** (2021): Investigation of Chlorophyll-a Derived Compounds as Photosensitizer for Photodynamic Inactivation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 16(1), 161-169.
 84. Reza, M., Utami, A. N., Amalina, A. N., Benu, D. P., Fatya, A. I., Agusta, M. K., Yuliarto, B., Kaneti, Y. V., Ide, Y., Yamauchi, Y., **Suendo, V.** (2021): Significant role of thorny surface morphology of polyaniline on adsorption of triiodide ions towards counter electrode in dye-sensitized solar cells. *New Journal of Chemistry*, 45(13), 5958-5970.
 85. Restiawaty, E., Maulana, A., Culsum, N. T. U., Aslan, C., **Suendo, V.**, Nishiyama, N., Budhi, Y. W. (2021): The removal of 3-monochloropropane-1, 2-diol ester and glycidyl ester from refined-bleached and deodorized palm oil using activated carbon. *RSC Advances*, 11(27), 16500-16509.
 86. Silmi, N., Febriyanti, E., Andriani, A., Arsyad, R., Steky, F. V., Mukti, R. R., **Suendo, V.** (2021): Textural control of bicontinuous concentric lamellar nanostructured mesoporous silica via low-pressure solvothermal method. *Materials Chemistry and Physics*, 265, 124492.
 87. Benu, D. P., Hardian, A., Mukti, R. R., Yuliarto, B., Fukumitsu, N., Ide, Y., Yamauchi, Y., Kaneti, Y. V., **Suendo, V.** (2021): Reverse micelle-mediated synthesis of plate-assembled hierarchical three-

- dimensional flower-like gamma-alumina particles. *Microporous and Mesoporous Materials*, 321, 111055.
88. Saputera, W. H., Putrie, A. S., Esmailpour, A. A., Sasongko, D., **Suendo, V.**, Mukti, R. R. (2021): Technology advances in phenol removals: Current progress and future perspectives. *Catalysts*, 11(8), 998.
 89. Saputera, W. H., Amri, A. F., Mukti, R. R., **Suendo, V.**, Devianto, H., Sasongko, D. (2021): Photocatalytic Degradation of Palm Oil Mill Effluent (POME) Waste Using BiVO₄ Based Catalysts. *Molecules*, 26(20), 6225.
 90. Milana, P., **Suendo, V.**, Pebriani, T., Steky, F. V., Benu, D. P., & Radiman, C. L. (2021): Surface amplification of tetraphenylporphyrin overtone and combination Raman bands in drop coating deposition Raman (DCDR) on electrically conductive surfaces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(34), 18830-18842.
 91. Rahmawati, F., Musyarofah, B., Nugrahaningtyas, K. D., Prasetyo, A., **Suendo, V.**, Haeruddin, H., Handaka, M. F. A., Nilasari, H., & Nursukatmo, H. (2021): A different zirconia precursor for Li₇La₃Zr₂O₁₂ synthesis. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2725-2734.
 92. Febriyanti, E., Silmi, N., **Suendo, V.**, Mukti, R. R., Vivitasari, P. U., Adhika, D. R., Majima, Y., Suprijadi, Ismunandar (2022): Thermodynamic Picture of Phase Segregation during the Formation of Bicontinuous Concentric Lamellar (bcl) Silica, *Langmuir*, 38(4), 1368–1379.
 93. Andriani, A., Benu, D. P., Megantari, V., Yulianto, B., Mukti, R. R., Ide, Y., Chowdhury, S., Amin, M. A., Kaneti, Y. V., **Suendo, V.** (2022): Role of urea on the structural, textural, and optical properties of macroemulsion-assisted synthesized holey ZnO nanosheets for photo-catalytic applications, *New Journal of Chemistry*, 46(20), 9897–9908.
 94. Wendari, T. P., Arief, S., Mufti, N., Blake, G. R., Baas, J., Suendo, V., Prasetyo, A., Insani, Zulhadjri, Z. (2022): Lead-Free Aurivillius Phase Bi₂LaNb_{1.5}Mn_{0.5}O₉: Structure, Ferroelectric, Magnetic, and Magnetodielectric Effects, *Inorganic Chemistry*, 61(23), 8644–8652.

95. Nisa K.S., **Suendo, V.**, Sophiana I.C., Susanto H., Kusumaatmaja A., Nishiyama N., Budhi Y.W. (2022): Effect of base promoter on activity of MCM-41-supported nickel catalyst for hydrogen production via dry reforming of methane, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(55), 23201–23212.
96. Raissa, Septiani, N. L. W., Wustoni, S., Failamani, F., Iqbal, M., Nugraha, **Suendo, V.**, Yuliarto, B. (2022): Improving capacity of nickel phosphate Versailles Santa Barbara-5 with calcination for high-performance asymmetric supercapacitors, *Journal of Energy Storage*, 56, 106109.
97. Reza, M., Nurfalah, F., Rahmawati, T., Milana, P., Amalina, A. N., Sunarya, R. R., Steky, F. V., **Suendo, V.** (2022): Sulfonated polyaniline synthesis via moistureproof sulfonation of emeraldine salt polyaniline for graphite-based composite counter electrode in dye-sensitized solar cells, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61(14), 1564–1577.
98. Kusuma, A. P., Soewandhi, S. N., Mauludin, R., **Suendo, V.**, Kurniawan, F., Pamungkas, G., Nugraha, Y. P. (2022): Energetics of carboxylic acid-pyridine heterosynthon revisited: A computational study of intermolecular hydrogen bond domination on phenylacetic acid-nicotinamide cocrystals, *Open Chemistry*, 20(1), 949–957.
99. Wustoni, S., Nikiforidis, G., Inal, S., Indartono, Y. S., **Suendo, V.**, Yuliarto, B. (2022): Hydroxymethyl PEDOT microstructure-based electrodes for high-performance supercapacitors, *APL Materials*, 10(61), 061101.
100. Wustoni, S., Nikiforidis, G., Ohayon, D., Inal, S., Indartono, Y. S., **Suendo, V.**, Yuliarto, B. (2022): Performance of PEDOTOH/PEO-based Supercapacitors in Agarose Gel Electrolyte, *Chemistry - An Asian Journal*, 17(171), e202200427.
101. Benu, D. P., Andriani, A., Silmi, N., Steky, F. V., Failamani, F., Yuliarto, B., Mukti, R. R., **Suendo, V.** (2023): Macroemulsion-mediated synthesis of fibrous ZnO microrods and their surface morphology contribution to the high photocatalytic degradation rate, *New Journal of Chemistry*, 47 (1), 428–442.
102. Arsyad, R., Silmi, N., Steky, F. V., Benu, D. P., Nugroho, F. G., Febriyanti, E., Iqbal, M., Yuliarto, B., Mukti, R. R., & **Suendo, V.**

- (2023). Digital validation of bicontinuous concentric lamellar morphology in spherical mesoporous silica particles using SEM image-based lamellae density calculations. *Advanced Powder Technology*, 34(11), 104229.
103. Silmi, N., Arsyad, R., Benu, D. P., Nugroho, F. G., Khasannah, W. L., Iqbal, M., Yulianto, B., Mukti, R. R., & **Suendo, V.** (2023). A morphological study of bicontinuous concentric lamellar silica synthesized at atmospheric pressure and its application as an internal micro-reflector in dye-sensitized solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(35), 23792-23807.
104. Fauziah, N., Silmi, N., Nugroho, F. G., Putra, K. L. H., Benu, D. P., Steky, F. V., Sunarya, R. R., Yulianto, B., Hidayat, R., & **Suendo, V.** (2023). Ultrasonication-modified electrochemically exfoliated graphene for counter electrode in dye-sensitized solar cells. *Carbon Trends*, 12, 100292.
105. Raissa, R., Septiani, N. L. W., Iqbal, M., **Suendo, V.**, & Yulianto, B. (2023, May). Synthesis of long VSB-5 microrod as electrochemical material via hydrothermal method. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2580, No. 1). AIP Publishing.
106. Sunarya, R. R., Fatya, A. I., **Suendo, V.**, & Hidayat, R. (2023, April). Combination of polyaniline and graphene oxide as counter electrode composites in dye-sensitized solar cells. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2646, No. 1). AIP Publishing.
107. Steky, F. V., Benu, D. P., Putra, K. L., Siddik, M. N., Adhika, D. R., Mukti, R. R., Yulianto, B., Mulyani, I., & **Suendo, V.** (2023). Contribution of the lamellar morphology to the photocatalytic activity of alkaline-hydrothermally treated titania in rhodamine B photodegradation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(6), 5183-5195.
108. Cahyo, I. N., Aini, N., Steky, F. V., **Suendo, V.**, Safitri, W. N., & Prasetyo, A. (2023). Synthesis of plate-like Fe-doped $\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ using $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$ molten salt method: XRD, Raman spectroscopy, SEM, and UV-VIS DRS studies. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 1-7.
109. Sumampouw, G.A., Indarto, A., **Suendo, V.**, Azis, M.M. (2023). Chemical and Biochemical Process Involved in the Degradation of Hazardous Contaminants through Bio and Nanoremediation. *Bio*

- and Nanoremediation of Hazardous Environmental Pollutants, pp. 256–282.
110. Fauziah, N., Khasannah, W. L., Andari, G. A., Fatya, A. I., Benu, D. P., Steky, F. V., Milana, P., Hidayat, R., & **Suendo, V.** (2023). Eco-friendly direct-current pulsed electropolymerization of polyaniline nanofibers on synthetic graphite substrate for counter electrode in dye-sensitized solar cells. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 62(6), 800-815.
 111. Anindita, P. A., Agson-Gani, P. A., Nugroho, F. G., Esyanti, R. R., **Suendo, V.**, & Dwivany, F. M. (2024). Nano-TiO₂ enhanced fruit storage chambers: unveiling the potential for prolonging banana shelf life. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 1-14.
 112. Nugroho, F. G., Agson-Gani, P. A., Anindita, P. A., Steky, F. V., Benu, D. P., Yulianto, B., Dwivany, F. M., **Suendo, V.**, Prolonging banana shelf life through visible light-induced ethylene scavenging using manganese-decorated TiO₂ via KMnO₄ reduction, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 691, 133817.
 113. Marsius, A. G., Hidayat, S., Adhika, D. R., Mustofa, A. Z. E., **Suendo, V.**, Rachmawati, H. (2024): Effect of Ag and Ni-Doped Cerium Oxide Nanoparticles on the Formation of ROS and Evaluation as an Alternative Physical Sunscreen Material, *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 72(2), 220–225.
 114. Septiani, N. L. W., Wustoni, S., Failamani, F., Wehbe, N., Eguchi, M., Nara, H., Inal, S., **Suendo, V.**, & Yulianto, B. (2024). Revealing the effect of cobalt content and ligand exchange in the bimetallic Ni–Co MOF for stable supercapacitors with high energy density. *Journal of Power Sources*, 603, 234423.
 115. Annas, D., Sembiring, K. C., Sofyan, M. I., Saputra, I. S., Madiabu, M. J., Fahmi, A. G., **Suendo, V.**, Mukti, R. R., Saepurahman & 'Adany, F. (2024). Phytosynthesis of CeO₂-ZnO Nanocomposites Mediated by *Parkia Speciosa* Hassk Bark Aqueous Extract as Superior Photocatalyst in Reduction of Nitroaromatic Compound. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(6), 374.
 116. Putra, K. L. H., Silmi, N., Nugroho, F. G., Himmah, S. N., Siddik, M. N., Fauziah, N., Steky, F. V., Benu, D. P., Milana, P., Yulianto,

- B. & **Suendo, V.** (2024). Fabrication of Binder-Free TiO₂ P 25 Films on Flexible PET/ITO Substrate for Photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells. *Optical Materials*, 115690.
117. Reza, M., Setiawan, K. M., Steky, F. V., Nugroho, F. G., Agusta, M. K., Indarto, A., & **Suendo, V.** (2024). Microwave-plasma surface modification of nanostructured-polyaniline: graphite composite counter electrode in dye-sensitized solar cells. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 694, 134134.

VII. PATEN

1. Alat untuk Mengatur Pematangan Buah Dari Material Bambu Yang Dikombinasikan Dengan Material Kimiawi Pemecah Etilen (Tersertifikasi).
2. Material Gamma Alumina (γ -Al₂O₃) Mesopori 3D Berstruktur Nano dengan Luas Permukaan dan Aksesibilitas Tinggi sebagai Katalis dan Penyangga Katalis serta Metode Sintesis Material tersebut Menggunakan Cetakan Misel Terbalik (Tersertifikasi).
3. Material Silika Mesopori KCC-1 untuk Katalis dan Penyangga Katalis menggunakan Benzalkonium Klorida serta Metode Pembuatan Material tersebut secara Solvotermal menggunakan Bejana Plastik (P00201809522, 2018).
4. Titanium Dioksida (TiO₂) Mesopori sebagai Fotokatalis yang Berstruktur Nano 3D Berpermukaan Luas dan Aksesibilitas Tinggi serta Metode Sintesisnya (P00202001627, 2020).

VIII. PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Indonesian representative in 56 th Lindau Nobel Laureate Meeting, 18 th Forum dedicated to Chemistry, Lindau, Germany	Global Young Academy Committees	2006
2.	Peneliti Muda Terbaik Bidang Ilmu Pengetahuan Alam dan Lingkungan pada Pemilihan Peneliti Muda Indonesia (PPMI) yang ke-14	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) dan Kementerian Riset dan Teknologi	2008
3.	Young Indonesian Scientist Symposium 2010 (Lokakarya Ilmuwan Muda Indonesia)	Indonesian Academy of Science (AIPI)	2010
4.	Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2013
5.	FMIPA Award 2019 in category Excellence in Research	FMIPA ITB	2019
6.	Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2022
7.	Penghargaan Bidang Pengajaran, Karya Inovasi, Penelitian serta Pengembangan Institusi dalam Acara Dies Natalis ITB ke-63: Bidang Karya dan Inovasi	Institut Teknologi Bandung	2022
8.	Penghargaan pengabdian 25 tahun Institut Teknologi Bandung	Institut Teknologi Bandung	2024

IX. SERTIFIKASI

Sertifikasi pendidik sebagai dosen profesional

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-571-2

