

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap penampilan di era modern ini, telah menjadikan estetika gigi sebagai salah satu perhatian utama dalam perawatan kesehatan gigi. Permasalahan estetik, seperti diskolorasi gigi, fraktur minor, diastema, bentuk gigi yang tidak proporsional, dan keausan permukaan gigi, sering kali menimbulkan ketidakpercayaan diri pada individu. Penggunaan bahan restoratif yang menyerupai warna dan struktur gigi alami menjadi pilihan utama dalam mengatasi hal tersebut. Resin komposit merupakan salah satu material yang paling sering digunakan dalam praktik kedokteran gigi estetik karena memiliki keunggulan dalam hal estetika, kemampuan adhesi yang baik terhadap struktur gigi, serta dapat diaplikasikan secara langsung (*direct restoration*) dalam satu kunjungan. Perkembangan teknologi pun telah menghasilkan jenis resin komposit yang lebih canggih, seperti nanohibrida, yang menawarkan hasil estetik tinggi dengan kekuatan mekanik yang lebih baik, sehingga mampu memberikan solusi jangka panjang terhadap permasalahan estetik gigi masa kini.

Resin komposit nanohibrida merupakan material restoratif yang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu matriks resin, partikel pengisi (*filler*), dan agen kopling (*coupling agent*). Inovasi pada resin komposit ini melibatkan kombinasi partikel pengisi berukuran nano dan mikro, yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik dan estetika material. Partikel nano memungkinkan peningkatan jumlah pengisi dalam resin, yang berkontribusi pada pengurangan kandungan resin matriks

dan, secara bersamaan, menurunkan tingkat penyusutan polimerisasi hingga sekitar 1% (Saad et al., 2024).

Resin komposit nanohibrida digunakan untuk restorasi langsung pada kavitas gigi dalam aplikasi klinis. Material ini memungkinkan penyesuaian warna dan kontur gigi, sehingga meningkatkan estetika restorasi. Penambahan nanopartikel seperti zirkonia dan alumina ke dalam resin komposit nanohibrida telah terbukti meningkatkan kekerasan *Vickers* dan kekuatan fraktur material, menjadikannya lebih tahan terhadap beban mastikasi dan aus (Nurul et al., 2024). Keunggulan lain dari resin komposit nanohibrida adalah kemampuan untuk menghasilkan permukaan restorasi yang lebih halus setelah pemolesan, yang penting untuk restorasi estetika. Distribusi partikel pengisi yang seragam dalam matriks resin berkontribusi pada peningkatan kekuatan tekan dan kekuatan lentur material (Mihaela et al., 2024).

Faktor yang menentukan tingkat polimerisasi saat proses polimerisasi berlangsung adalah intensitas cahaya dan waktu penyinaran. Waktu penyinaran resin komposit nanohibrida secara umum adalah sekitar 20–40 detik untuk ketebalan lapisan 2 mm, dengan intensitas cahaya minimal 1000 mW/cm² agar tercapai tingkat polimerisasi yang memadai dan kekerasan permukaan yang optimal. Resin komposit nanohibrida, seperti resin konvensional lainnya, biasanya diaplikasikan menggunakan teknik inkremental (bertahap), dengan setiap lapisan setebal maksimal 2 mm agar penetrasi cahaya cukup dalam untuk memastikan polimerisasi sempurna. Intensitas cahaya di bawah standar atau waktu penyinaran yang terlalu singkat dapat menyebabkan *incomplete polymerization*, yang

berdampak pada penurunan sifat mekanik seperti kekerasan dan daya tahan aus. (Megha Gughani et al., 2022; Noha Abdullah et al., 2021).

Kekerasan permukaan merupakan salah satu sifat mekanik penting dari resin komposit nanohibrida yang menentukan ketahanan material terhadap beban mastikasi serta keausan permukaan. Kekerasan ini diartikan sebagai ketahanan bahan terhadap penetrasi atau deformasi lokal akibat gaya eksternal. Sifat ini sangat bergantung pada keberhasilan proses polimerisasi, yang akan menentukan kualitas matriks resin serta ikatan antar partikel pengisi. (Bilge & İpek, 2024). Proses penyinaran yang tidak optimal, baik dari segi durasi maupun intensitas cahaya, dapat menyebabkan polimerisasi yang tidak sempurna. Ikatan silang dalam matriks resin akan terbentuk lebih sedikit ketika tingkat polimerisasi rendah, yang berdampak pada penurunan kekerasan permukaan, hal ini menjadi perhatian khusus pada resin komposit nanohibrida, karena material ini mengandung partikel nano dan mikro yang membutuhkan pencahayaan merata untuk menghasilkan struktur polimer yang stabil. (Kaptan et al., 2021).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh lama waktu penyinaran terhadap sifat fisik dan sifat mekanik resin komposit nanohibrida. Penelitian oleh Haifa Barakah (2021) menguji efek variasi waktu (20, 40, dan 60 detik) dan jarak (0, 2, 4 mm) penyinaran pada komposit Tetric-N-Ceram. Hasil uji kekerasan *Vickers* (VHN) menunjukkan bahwa peningkatan durasi penyinaran dari 20 menjadi 40 bahkan 60 detik secara signifikan meningkatkan nilai VHN baik di permukaan atas maupun bawah, terutama saat menggunakan lampu LED intensitas tinggi (*Blue-Phase-G2*). Hasil serupa juga ditemukan dalam penelitian oleh Duratbegović et al. (2024), yang meneliti efek intensitas cahaya, waktu *curing* (20

dan 40 detik), dan jarak (0 dan 8 mm) pada kekerasan permukaan (VHM) dan rasio *hardness bottom-to-top* komposit Tetric EvoCeram. Hasilnya menegaskan bahwa memperpanjang durasi dari 20 ke 40 detik secara signifikan meningkatkan VHM bagian bawah dan rasio *bottom-to-top*, terutama saat *curing* dari jarak yang lebih jauh. Studi lain dilakukan oleh Zuloeta-Navarro & Orrego-Ferreyros (2023), yang meneliti komposit P60 (nanohibrida) dan Z250 (mikrohibrida), dengan penyinaran pada jarak 2 dan 4 mm. Tidak terdapat penurunan signifikan pada kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida, nilai VHN tetap stabil di kedua kondisi, hal ini menegaskan bahwa durasi optimal dapat mempertahankan kekerasan permukaan meski jaraknya bervariasi. Oglakci et al. (2022) menyelidiki pengaruh mode (*standard* dan *high-power*) dan durasi (12 dan 20 detik) penyinaran LED generasi ketiga terhadap kekerasan dan sifat mekanik nanokomposit Estelite Posterior Quick dan Solare X. Hasil menunjukkan bahwa durasi lebih panjang (20 detik) dalam mode *high-power* secara signifikan meningkatkan kekerasan permukaan (HV) dibandingkan durasi pendek (12 detik).

Tidak semua penelitian menunjukkan pengaruh signifikan dari peningkatan waktu penyinaran terhadap kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida. Penelitian oleh Loraine et al. (2024) mengkaji pengaruh jarak *curing* dan *preheating* terhadap derajat konversi dan kekerasan. Hasilnya menunjukkan bahwa *preheating* memberikan peningkatan pada *microhardness*, sedangkan durasi *curing* (20 atau 40 detik) tidak membedakan kekerasan permukaan secara signifikan, hal ini menegaskan bahwa variabel non-durasi (*preheating*, jarak lampu) lebih dominan daripada panjang waktu *curing*. Penelitian yang dilakukan oleh Daher et al. (2022) mengevaluasi efek lama penyinaran (10, 20, 30, 40, 90 detik) terhadap kekerasan

pada dua kedalaman permukaan resin *nanohybrid* CAD-CAM (*Lava Ultimate*). Hasil uji *Vickers microhardness* menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan antara 20, 30, dan 40 detik, terutama pada kedalaman menengah (200 μm dan 500 μm). Perbedaan hanya terlihat pada durasi ekstrem (10 detik dan 90 detik) menunjukkan bahwa memperpanjang di atas 10 detik tidak menambah kekerasan secara berarti.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penting untuk mengeksplorasi lebih lanjut mengingat hasil dari studi-studi sebelumnya yang masih menunjukkan perbedaan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh lamanya waktu penyinaran yaitu selama 20, 30, dan 40 detik terhadap kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur dalam bidang ilmu kedokteran gigi, khususnya dalam ilmu bahan restoratif komposit nano.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka muncul permasalahan yaitu:

Apakah lamanya waktu penyinaran dapat mempengaruhi kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh lamanya waktu penyinaran terhadap kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida.

1.3.2 Tujuan Khusus

Tujuan khusus dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui perbedaan kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida yang disinari selama 20 detik dan 30 detik.
2. Untuk mengetahui perbedaan kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida yang disinari selama 20 detik dan 40 detik.
3. Untuk mengetahui perbedaan kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida yang disinari selama 30 detik dan 40 detik.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Akademik

Manfaat akademik dari penelitian ini adalah untuk menambah pengetahuan mengenai resin komposit nanohibrida dalam bidang kedokteran gigi juga sebagai dasar penelitian lebih lanjut tentang pengaruh lamanya waktu penyinaran terhadap kekerasan permukaan resin komposit nanohibrida.

1.4.2 Manfaat Praktis

Manfaat praktis dari penelitian ini adalah sebagai salah satu dasar pertimbangan dalam menentukan waktu penyinaran resin komposit nanohibrida dalam pengaplikasian klinis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Resin Komposit

Resin komposit telah diakui secara global sejak diperkenalkan oleh Bowen pada akhir 1950-an hingga awal 1960-an sebagai pengganti semen silikat dalam restorasi gigi anterior, karena kemampuannya dalam menghasilkan restorasi dengan estetika tinggi yang menyerupai warna gigi alami (Kowalska et al., 2021). Material ini umumnya terdiri dari tiga komponen matriks resin organik seperti Bis-GMA, UDMA, dan TEGDMA; partikel *filler* anorganik (misalnya silika, kuarsa, kaca barium); serta *coupling agent* seperti silan γ -MPS yang bekerja secara sinergis menciptakan struktur komposit yang kuat dan kohesif. Matriks resin berfungsi sebagai fase kontinu yang menyatukan *filler*, sedangkan pigmen dan *photoinitiator* seperti *camphorquinone* beserta aktivator amina diperlukan untuk menyelaraskan warna dengan gigi asli dan memulai proses polimerisasi saat terkena cahaya biru (*wavelength* ~460–480 nm). Inhibitor seperti BHT juga ditambahkan untuk mencegah polimerisasi prematur akibat paparan cahaya *ambient*, menjaga kestabilan warna dan sifat mekanis komposit (Alsharif et al., 2024).

2.2 Komponen Resin Komposit

2.2.1 Matriks Resin

Matriks resin dalam komposit gigi umumnya terdiri dari monomer metakrilat, seperti Bis-GMA, UDMA, dan TEGDMA. Bis-GMA, yang dihasilkan dari reaksi bisfenol A dan glisidil metakrilat, adalah monomer yang paling sering digunakan karena sifatnya membentuk jaringan polimer yang kokoh dan tahan

lama. UDMA dipilih karena kemampuannya meningkatkan elastisitas dan kekuatan mekanik material secara signifikan. TEGDMA sebagai monomer berdensitas rendah, bertugas mengencerkan viskositas resin agar lebih mudah digunakan, namun penggunaan dalam jumlah besar dapat meningkatkan penyusutan selama proses polimerisasi (Agata et al., 2022).

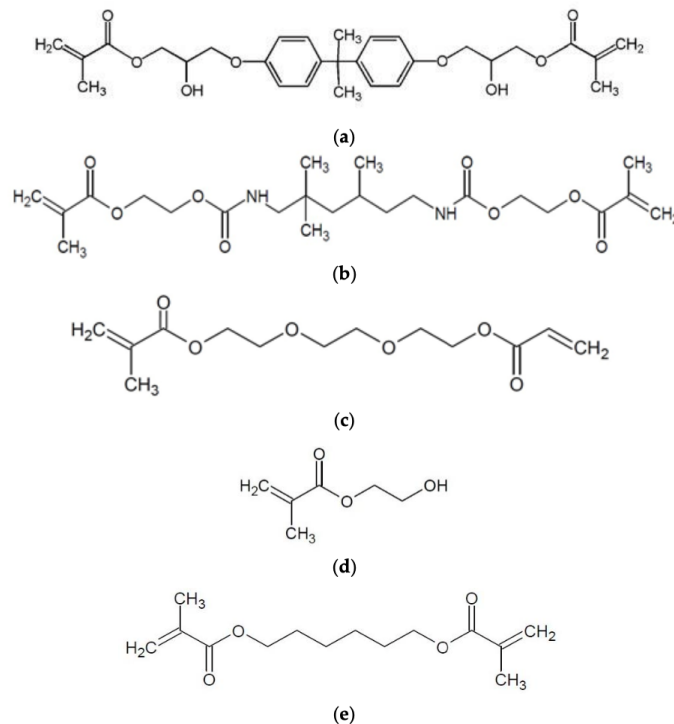


Figure 1. Chemical structures of bisphenol A-glycidyl methacrylate (bis-GMA, (a)), urethane dimethacrylate (UDMA, (b)), triethylene glycol dimethacrylate (TEGDMA, (c)), 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA, (d)) and 1,6-hexanediol dimethacrylate (HDDMA, (e)) monomers.

Gambar 2. 1 Struktur Kimia Matriks Resin Komposit
Sumber: Agata, et al. (2022)

2.2.2 Partikel Pengisi (*Filler*)

Partikel *filler* dalam resin komposit berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kapasitas mekanik dan pengurangan penyusutan selama polimerisasi. Partikel yang umumnya digunakan adalah silika, kuarsa, dan kaca, termasuk varian borosilikat dan aluminosilikat, yang sering diolah dengan oksida logam seperti barium untuk menambah radiopasitas material (Lopez, et al., 2024). Transparansi

visual *filler* pun disesuaikan untuk menyerupai jaringan gigi agar menunjang estetika restorasi. Pencocokan indeks refraksi antara *filler* dan matriks resin juga krusial guna memperoleh efek visual yang alami dan kontras minim (Bhandi et al., 2021).

2.2.3 Agen Kopling (*Coupling Agent*)

Agen kopling berfungsi sebagai penghubung kimia antara partikel pengisi anorganik dan matriks resin organik. Silan, terutama γ -methacryloxypropyltrimethoxysilane (γ -MPS), adalah *coupling agent* yang paling umum digunakan karena mampu membentuk ikatan kovalen pada permukaan kaca *filler* di satu sisi, dan sisi lainnya berikatan dengan rantai polimer resin. Pengolahan silan yang tepat meningkatkan kohesi antarmuka dan memperkuat transfer beban mekanis dari resin ke *filler*, sehingga meningkatkan sifat mekanik komposit. *Coupling agent* yang efektif dapat mengurangi penetrasi air di antarmuka *filler*-resin, sehingga meningkatkan stabilitas hidrofilik dan mencegah degradasi akibat kelembapan (Thadathil Varghese et al., 2023).

2.2.4 Sistem Inisiator-Aktivator

Proses polimerisasi pada resin komposit dimulai dengan pembentukan radikal bebas, yang dapat diinisiasi melalui metode kimia menggunakan sistem redoks antara benzoyl peroksida dan amina tersier. Dalam sistem polimerisasi kimia dua pasta, satu mengandung benzoyl peroksida sebagai zat penginisiasi dan yang lainnya mengandung amina tersier sebagai aktivator; saat dicampur, reaksi redoks menghasilkan radikal bebas yang memicu polimerisasi rantai metakrilat (Kowalska et al., 2021). Sebagian besar komposit modern menggunakan polimerisasi yang

diaktifkan oleh cahaya tampak (bukan ultraviolet) dengan panjang gelombang ideal sekitar 468 nm. Sistem fotoinisiator umumnya mengandalkan *camphorquinone*, sebuah α -diketona, yang bersama *co-initiator* seperti amina, menghasilkan radikal bebas saat tereksitasi oleh cahaya dalam rentang 360–510 nm dengan puncak absorbansi di 468 nm (Jäger et al., 2021). Metode fotopolimerisasi ini banyak dipilih karena memberikan kontrol waktu pengerjaan yang lebih baik dan kenyamanan klinis, serta menghasilkan konversi polimer yang lebih stabil dibandingkan metode kimia (Kowalska et al., 2021).

2.2.5 Inhibitor

Butylated hydroxytoluene (BHT) sering digunakan dalam formulasi resin komposit sebagai inhibitor polimerisasi spontan. Penambahan BHT dalam konsentrasi sekitar 0,01% berat dapat memperpanjang masa simpan material dan memberikan waktu kerja yang cukup sebelum proses pengerasan dimulai. Studi menunjukkan bahwa konsentrasi BHT antara 0,25% hingga 0,5% berat efektif dalam mengurangi stres akibat *shrinkage* tanpa mempengaruhi sifat fisikokimia lainnya dari resin komposit eksperimental (Roberta et al., 2024).

2.2.6 Modifier Optik

Komposit gigi modern kerap diperkaya dengan *opacifier* sebagai usaha mencapai estetika yang menyerupai jaringan gigi alami. *Opacifier* tersebut berupa oksida logam seperti titanium dioksida (TiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), dan zirkonium oksida (ZrO_2) untuk meningkatkan tingkat opasitas sekaligus mengatur tingkat translusensi material (Vichi et al., 2023). TiO_2 dikenal efektif dalam menyebarkan cahaya sehingga mampu menyembunyikan perubahan warna pada

substrat gigi, sedangkan Al_2O_3 dan ZrO_2 memberikan kontribusi signifikan melalui sifat optiknya yang mendekati struktur enamel (Mandurino et al., 2025). Kombinasi oksida-oksida tersebut memungkinkan restorasi tampil natural dengan transparansi yang dioptimalkan untuk menciptakan keselarasan visual dengan gigi asli (Bai et al., 2024).

2.3 Jenis-Jenis Resin Komposit

2.3.1 Komposit Small Particle

Komposit bertipe *small particle* menggunakan partikel pengisi berukuran antara 0,1 hingga 10 μm , yang menyuguhkan kekuatan mekanis memadai namun sifat materialnya lebih rapuh. Kekakuan tinggi ini membuatnya kurang ideal untuk area beban besar, tetapi permukaannya bisa dipoles halus sehingga sering dipakai pada restorasi anterior karena estetika yang lebih baik (Wang et al., 2023). Tekstur permukaan yang halus setelah pemolesan membantu mengurangi penyerapan noda dan memperpanjang penampilan estetik gigi (Zhang et al., 2024). Kekurangan dari komposit ini adalah memiliki struktur yang rapuh, sehingga membuatnya lebih rentan terhadap retak di bawah tekanan ekstrapaksimal (Li & Chen, 2022).

2.3.2 Komposit Microfilled

Komposit mikrofil mengandung partikel silika berukuran submikron sekitar 0,01 hingga 0,1 μm , dengan rata-rata dekat 0,04 μm . Keunggulan dari komposit ini terletak pada kemampuannya dalam menghasilkan permukaan yang sangat halus setelah proses pemolesan, menjadikannya komposit favorit dalam kasus restorasi estetik tinggi (Doe & Smith, 2023). Kekurangan dari komposit mikrofil ditemukan pada tepi restorasi yang cenderung *crack initiation*, akibat kurangnya kohesi antara

filler dan matriks resin sebelum polimerisasi sempurna. Kekurangan lain dari komposit ini adalah tingkat keausan yang lebih cepat dibandingkan komposit hibrida yang membuatnya kurang cocok digunakan pada area beban posterior (Lee et al., 2024).

2.3.3 Komposit *Hybrid*

Komposit hibrida memadukan pengisi besar (1–50 μm) dan submikron ($\sim 0,04 \mu\text{m}$) dalam proporsi sekitar 75 % pengisi besar dan 8 % pengisi kecil. Kombinasi ini menghasilkan material yang mampu menahan beban tinggi dan tetap mempertahankan permukaan estetik, sehingga cocok digunakan pada restorasi anterior maupun posterior. Keunggulannya termasuk ketahanan fraktur dan abrasi yang baik, penyusutan polimerisasi yang rendah, serta sifat hidrofobik yang mengurangi absorpsi cairan (Zubrzycki et al., 2023). Kekurangan dari komposit ini terletak pada distribusi pengisi yang kompleks dengan memerlukan prosedur pemolesan optimal untuk mempertahankan batas tepi rempah yang kuat (Redwan et al., 2024).

2.3.4 *Nanocomposite*

Nanokomposit adalah evolusi dari komposit hibrida, menggunakan partikel pengisi sangat kecil yakni $\leq 1 \mu\text{m}$, yang mengkombinasikan kelebihan mekanik hibrida dan kemampuan polesan mikrofil. Material ini menunjukkan ketahanan aus tinggi dan penyusutan polimerisasi yang rendah, memberikan performa jangka panjang lebih baik (Zhang et al., 2023). Nanokomposit mampu mempertahankan kilau dan warna restorasi dalam jangka panjang, bahkan setelah paparan minuman dan siklus pH oral (Redwan et al., 2024). Tantangan teknik selama aplikasi klinis

dari nanokomposit adalah polimerisasi dan distribusi *filler* nano yang merata (Li & Chen, 2022).

a. Komposit *Nanofilled*

Tipe *nanofilled* memanfaatkan partikel berukuran 1–100 nm yang tersebar seragam di seluruh matriks, termasuk klaster nanopartikel seperti nanosilika atau kombinasi zirkonia/silika. Ukuran pengisi ini memungkinkan permukaan akhir yang sangat halus setelah pemolesan, tanpa mengorbankan kekuatan mekanik, seperti yang biasa ditemukan pada komposit mikrohibrida. Ketahanan aus komposit *nanofilled* juga meningkat, dengan pengurangan abrasi signifikan dibandingkan komposit konvensional (Redwan et al., 2024). Kekurangan dari komposit ini terletak pada kombinasi nanopartikel dalam klaster, karena dapat menimbulkan tantangan dalam homogenitas distribusi yang memerlukan teknik pencampuran cermat (Zhang et al., 2023).

b. Komposit *Nanohybrid*

Komposit nanohibrida merupakan campuran partikel besar (0,4–5 μm) dan nanopartikel (~40–50 nm) yang memadukan kekuatan dan estetika menjadi satu material. Partikel nano mengisi celah antara partikel besar untuk menciptakan distribusi *filler* yang padat dan kompak, meningkatkan konsistensi mekanik (Zubrzycki et al., 2023). Kemunculan partikel mikro yang lebih besar seiring waktu, bisa menyebabkan permukaan restorasi kehilangan kilau dan muncul abrasif mikrologam. Sebaliknya, ukuran partikel yang relatif besar juga membantu mengurangi

penyerapan air dibandingkan komposit *nanofilled*, sehingga stabilitas dimensi lebih baik (Redwan et al., 2024).

Struktur partikel pada resin komposit nanohibrida sangat memengaruhi proses polimerisasi dan sifat akhir material restoratif. *Nanohybrid* menggabungkan nanopartikel (<100 nm) dengan partikel submikron untuk menciptakan distribusi *filler* yang lebih padat dan efisien dalam matriks resin, sehingga meningkatkan derajat konversi dan kekerasan permukaan setelah penyinaran cahaya karena adanya area kontak yang lebih besar antara *filler* dan matriks resin (Păstrav et al., 2024). Partikel nano yang lebih kecil ini mempercepat reaksi polimerisasi dengan menyediakan jalur mikro untuk difusi radikal bebas selama *curing*, membuat komposit berpotensi mencapai tingkat polimerisasi lebih tinggi pada durasi penyinaran yang optimum, yang berimplikasi pada meningkatnya sifat mekanik seperti modulus elastis dan ketahanan aus (Nuradnin et al., 2024). Ukuran partikel yang beragam dan distribusi resin komposit nanohibrida membantu menurunkan tegangan internal akibat penyusutan polimerisasi, yang penting untuk mencegah retakan mikro pada restorasi di gigi posterior (Pizzolotto et al., 2022). Oleh karena itu, struktur partikel nanohibrida yang terdispersi dengan baik berkaitan langsung dengan efisiensi polimerisasi serta penentuan stabilitas mekanik dan durabilitas restorasi dalam jangka panjang.

Resin komposit nanohibrida dalam praktik klinis telah terbukti memberikan keseimbangan antara kekuatan mekanik yang memadai dan estetika yang baik, sehingga banyak direkomendasikan untuk restorasi gigi

posterior yang harus menahan beban kunyah yang tinggi (Heintze et al., 2022). *Nanohybrid* menunjukkan nilai *compressive strength*, *flexural strength*, dan kekerasan permukaan yang kompetitif dibandingkan dengan komposit hibrid atau *microfilled*, sehingga memungkinkan penggunaannya pada restorasi kelas I dan II pada gigi posterior tanpa mengorbankan performa klinis jangka panjang (Păstrav et al., 2024). Sifat *wear resistance* yang baik dan kemampuan resin komposit nanohibrida dalam mempertahankan permukaan halus setelah polesan, juga membuat *nanohybrid* cocok untuk restorasi yang estetik sekaligus fungsional, walaupun tetap diperlukan teknik penyinaran dan *incremental layering* yang tepat untuk memaksimalkan polimerisasi dan meminimalkan risiko kegagalan restorasi (Pizzolotto et al., 2022). Kombinasi *filler* yang padat dan matriks resin yang stabil turut mendukung penggunaan *nanohybrid* di berbagai kelas kavitas, termasuk restorasi molar dan premolar, yang membutuhkan kekuatan mekanik tinggi sekaligus estetika yang diinginkan pasien modern.

2.4 Teknik Aplikasi Resin Komposit

Teknik inkremental mensyaratkan penempatan resin komposit secara berlapis-lapis tipis mutu tinggi untuk memastikan polimerisasi optimal di setiap lapisan. Pendekatan ini memungkinkan kontrol lebih baik atas konformasi restorasi dan mengurangi stres internal akibat penyusutan, tetapi membutuhkan waktu lebih lama dan teknik operator lebih presisi (Sengupta et al., 2023). Sebaliknya, metode bulk-fill memungkinkan pengisian kavitas dengan lapisan tunggal dalam ketebalan hingga 4 mm, sehingga mempercepat prosedur klinis dan mengurangi potensi

kontaminasi material selama aplikasi (Ivoclar et al., 2023). Studi jangka panjang menunjukkan bahwa restorasi bulk-fill secara klinis dapat menandingi ketahanan restorasi inkremental dalam jangka waktu 6 bulan sampai 10 tahun (Sengupta et al., 2023).

2.5 Keuntungan dan Kerugian Resin Komposit

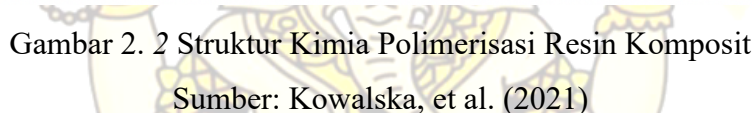
Estetika superior yang ditawarkan komposit resin menjadi pilihan utama karena kemampuannya menyamai warna gigi alami dan menyatu secara visual, khususnya pada restorasi anterior. Teknik preparasi untuk komposit juga bersifat konservatif dengan pengurangan jaringan gigi minimal dan tidak memerlukan mayoritas retensi mekanis, sehingga mempertahankan struktur alami lebih baik (Çağırır Dindaroğlu & Yılmaz, 2024). Adhesi mikro-mekanik resin terhadap enamel dan dentin meningkatkan retensi restoratif serta menurunkan risiko kebocoran mikro, sehingga memperpanjang umur pemakaian restorasi (Sengupta et al., 2023). Kerugian dari resin komposit adalah polimerisasi menyebabkan penyusutan internal, yang dapat memicu stres rongga restorasi dan berpotensi membentuk celah mikro yang membuka jalur karies sekunder (Duratbegović et al., 2024). Prosedur ini juga sensitif terhadap kelembapan, membutuhkan isolasi yang ketat dan keahlian operator yang tinggi (Sengupta et al., 2023). Koefisien ekspansi termal yang lebih tinggi pada resin dibandingkan jaringan gigi juga dapat menimbulkan stres termal dan berpotensi menyebabkan kegagalan restorasi bila tidak dikontrol dengan baik (Çağırır Dindaroğlu & Yılmaz, 2024).

2.6 Teknik Polimerisasi Resin Komposit

Kesuksesan polimerisasi komposit sangat tergantung pada intensitas dan kualitas sinar, lamanya penyinaran, jarak antara lampu dan material, serta ketebalan lapisan resin. Rekomendasi intensitas minimum adalah 300 mW/cm^2 dengan panjang gelombang 400–500 nm, sementara ketebalan masing-masing lapisan sebaiknya tidak melebihi 2 mm agar sinar dapat menembus dengan efektif. Penelitian *in vitro* menunjukkan bahwa intensitas rendah atau jarak terlalu jauh ($> 8 \text{ mm}$) dapat mengurangi kekerasan bawah (VMH-B) dan rasio kekerasan bawah-atas ($< 80 \%$). Peningkatan waktu penyinaran (dari 20 menjadi 40 detik) dapat memperbaiki kualitas polimerisasi. Penggunaan intensitas tinggi sangat dekat permukaan meningkatkan suhu material, sehingga diperlukan kehati-hatian agar tidak mencapai tingkat risiko pada pulpa (Duratbegović et al., 2024; Maucoski et al., 2023).

2.7 Proses Polimerisasi Resin Komposit

Polimerisasi radikal bebas adalah mekanisme dasar yang mengeraskan resin komposit, melalui tiga tahap utama, yaitu inisiasi, propagasi, dan terminasi. Tahapan ini bertujuan membentuk jaringan polimer silang yang kokoh dan stabil, menjaga integritas mekanik material (Wu et al., 2021). Keseluruhan proses sangat bergantung pada efisiensi penciptaan dan pengendalian radikal bebas dalam sistem resin metakrilat (David C. Watts, 2023). Kondisi lingkungan, seperti radiasi cahaya dan keberadaan oksigen, juga mempengaruhi laju pembentukan dan stabilisasi struktur polimer (Wu et al., 2021; David C. Watts, 2023).



2.7.1 Inisiasi

Mekanisme polimerisasi resin komposit dimulai oleh fotoinisiator pada tahap inisiasi, umumnya kamforokuinon (CQ), yang berperan penting dalam menyerap energi cahaya biru dengan panjang gelombang sekitar 470 nm. CQ mengalami eksitasi menuju keadaan triplet setelah menyerap foton, lalu bereaksi dengan donor elektron seperti amina tersier. Reaksi ini menghasilkan radikal bebas yang sangat reaktif. Radikal bebas inilah yang kemudian menyerang ikatan rangkap karbon-karbon ($C=C$) pada gugus metakrilat monomer, sehingga terbentuk radikal baru yang melekat pada struktur monomer (Kowalska et al., 2021).

2.7.2 Propagasi

Tahap propagasi ditandai dengan pertumbuhan rantai polimer melalui penambahan berulang-ulang radikal ke ikatan rangkap dari monomer metakrilat lainnya. Terbentuk radikal baru pada ujung rantai setiap kali radikal menyerang

ikatan rangkap, yang siap bereaksi kembali. Setiap molekul monomer memiliki dua situs reaktif yang memungkinkan terjadinya ikatan silang (*crosslinking network*) karena monomer utama pada resin komposit adalah dimetakrilat (seperti Bis-GMA, UDMA, dan TEGDMA). Jaringan tiga dimensi yang dihasilkan memberikan sifat mekanis yang kuat dan ketahanan aus yang tinggi pada material resin komposit (Kowalska et al., 2021).

2.7.3 Terminasi

Tahap terminasi terjadi ketika dua radikal bertemu dan saling berikatan, sehingga menghentikan pertumbuhan rantai polimer. Proses terminasi dapat berlangsung melalui kombinasi (dua rantai radikal bergabung menjadi satu) atau melalui disproporsionasi (pemindahan atom hidrogen dari satu radikal ke radikal lain). Terminasi menghasilkan struktur polimer dengan ikatan tunggal yang stabil pada bagan yang ditunjukkan, menandai akhir dari reaksi polimerisasi. Tahap ini sangat berpengaruh pada derajat konversi dan sifat akhir resin komposit, termasuk kekerasan permukaan, stabilitas dimensional, serta ketahanan terhadap degradasi kimia. Terminasi yang terlalu cepat dapat menyebabkan adanya monomer tak bereaksi, yang berdampak negatif pada biokompatibilitas dan stabilitas jangka panjang material (Kowalska et al., 2021).

2.8 Karakteristik Resin Komposit

Resin komposit menampilkan beberapa sifat fisik kritis, seperti penyusutan saat polimerisasi, ekspansi termal, konduktivitas panas, daya serap air, radiopasitas, serta kelarutan zat dalam air (Kazak et al., 2024). Sisi mekanik komposit dinilai berdasarkan kekuatan lentur, modulus elastisitas, kekerasan permukaan, dan kemampuan menahan keausan (Gulroy et al., 2023). Kombinasi sifat fisik dan

mekanik tersebut menentukan performa klinis jangka panjang restorasi. Ketidakseimbangan salah satu sifat tersebut dapat menyebabkan kegagalan restorasi akibat keausan, retensi retak, atau ketidakstabilan dimensi (Kazak et al., 2024; Gulroy et al., 2023).

2.8.1 Kekerasan Permukaan

Nilai kekerasan permukaan resin komposit sangat dipengaruhi oleh parameter penyinaran, termasuk durasi, intensitas cahaya, dan jarak antara ujung *light curing unit* (LCU) dengan permukaan material. Studi *in vitro* menunjukkan bahwa peningkatan durasi penyinaran dan intensitas cahaya secara signifikan dapat meningkatkan nilai *Vickers Hardness Number* (VHN) karena efek positifnya terhadap tingkat konversi monomer menjadi polimer, sehingga menghasilkan jaringan silang yang lebih padat dan tahan deformasi (Duratbegović et al., 2024). Jarak penyinaran yang lebih jauh menyebabkan penurunan intensitas radiasi yang diterima oleh komposit, mengurangi derajat konversi serta kekerasan permukaan terutama pada lapisan bawah restorasi (Duratbegović et al., 2024). Komposisi resin dan *filler* juga mempengaruhi seberapa efektif cahaya dapat menembus dan mengaktifkan fotoinisiator di dalam material, sehingga perubahan parameter penyinaran tidak selalu menghasilkan peningkatan kekerasan yang linier pada semua jenis komposit (Duratbegović et al., 2024).

Komponen internal resin komposit, termasuk tipe, ukuran, dan proporsi *filler*, turut mempengaruhi sifat mekanik termasuk kekerasan permukaan. *Filler* dengan ukuran partikel yang lebih kecil dan distribusi yang seragam cenderung menghasilkan permukaan yang lebih padat dan meningkatnya kekerasan, karena area permukaan antara matriks resin dan *filler* lebih besar, sehingga transmisi

mekanik dapat lebih efektif (Chen et al., 2023). Penelitian juga menunjukkan bahwa variasi karakteristik *filler* (misalnya *filler* nano vs mikro) berbeda dalam kontribusinya terhadap *wear resistance* dan kekerasan permukaan, dimana *nanohybrid* dan *nanofilled* memberikan permukaan yang halus namun mungkin memiliki kekerasan yang bervariasi bergantung pada komposisi spesifiknya (Chen et al., 2023). Di sisi lain, *filler* dengan volume fraksi lebih tinggi umumnya meningkatkan modulus elastis dan kekerasan, tetapi jika ukuran partikel sangat besar atau distribusinya buruk, hal ini justru dapat menurunkan kekerasan karena penciptaan *void* atau hambatan penetrasi cahaya *curing* (Chen et al., 2023).

Kekerasan permukaan resin komposit yang optimal dalam praktik klinis kedokteran gigi sangat penting untuk keberhasilan restorasi jangka panjang, terutama pada area posterior yang mengalami beban kunyah tinggi. Nilai kekerasan yang lebih tinggi menunjukkan resistensi abrasi yang lebih baik terhadap kontak dengan antagonis gigi dan partikel makanan, serta dapat mengurangi keausan restorasi sehingga mempertahankan bentuk dan fungsi restoratif lebih lama (Chen et al., 2023). Kekerasan permukaan yang adekuat juga berkorelasi dengan *degree of conversion* yang lebih tinggi, yang berimplikasi pada stabilitas kimia material dan resistensi terhadap degradasi oleh lingkungan oral seperti paparan pH dan suhu yang berubah-ubah (Duratbegović et al., 2024). Oleh karena itu, pemilihan parameter penyinaran yang tepat dan material dengan karakteristik *filler* yang sesuai harus disesuaikan dengan kebutuhan klinis untuk mencapai kekerasan permukaan yang memadai tanpa mengorbankan keawetan atau integritas restorasi (Duratbegović et al., 2024; Chen et al., 2023).

2.8.2 Kelarutan dan Absorpsi Air

Kelarutan dan absorpsi air resin sangat dipengaruhi oleh komposisi matriks resin dan volume fraksi *filler* (Kazak et al., 2024). Komposit yang menggunakan monomer TEGDMA cenderung lebih higroskopis dibanding Bis-GMA atau UDMA, sehingga menyerap lebih banyak air (Shalaby et al., 2022). Penyerapannya bisa menyebabkan pelemahan struktur dan degradasi terutama jika antarmuka *filler*–resin kurang stabil (Kazak et al., 2024). Koleksi data pada bulk-fill nanokomposit menunjukkan tingkat absorpsi air dan kelarutan yang rendah dibanding komposit mikrofil atau bulk-fill lainnya (Alzahrani et al., 2023).

2.8.3 Keausan Permukaan

Keausan permukaan resin terkait erat dengan tekstur dan topografi yang terbentuk selama beban fungsional seperti mengunyah. Proses keausan menyebabkan penurunan kekerasan dan perubahan struktur permukaan, yang dapat memengaruhi kenyamanan dan nilai estetis restorasi (Gulroy et al., 2023). Studi menunjukkan bahwa komposit nanofilled dan bulk-fill dengan sistem fotoinisiator kompleks memiliki resistensi aus lebih baik dibandingkan tipe mikrofil (Baltacıoğlu et al., 2024). Keausan yang minimal penting untuk mempertahankan integritas restorasi dalam jangka panjang dan mencegah retensi plak serta perubahan warna permukaan (Gulroy et al., 2023).

2.9 Penyinaran (*Light Curing*)

2.9.1 *Light Curing History*

Penggunaan unit penyinaran cahaya (*light-curing units/LCUs*) dalam kedokteran gigi telah mengalami evolusi signifikan sejak diperkenalkannya resin

komposit yang dapat diawetkan dengan cahaya pada awal 1970-an. LCUs awalnya menggunakan sinar ultraviolet (UV) untuk menginisiasi polimerisasi resin, namun pendekatan ini menimbulkan kekhawatiran terkait potensi kerusakan jaringan lunak dan mata akibat paparan sinar UV. Teknologi LCUs sebagai respons berkembang untuk menggunakan spektrum cahaya tampak, terutama cahaya biru, yang lebih aman dan efektif dalam mengawetkan material resin komposit. (American Dental Association, 2021).

Pengembangan LCUs mencakup beberapa teknologi utama, yaitu QTH, PAC, dan LED. QTH adalah penerus awal unit UV, menawarkan spektrum cahaya yang luas namun dengan intensitas radiasi yang lebih rendah, sehingga membutuhkan waktu eksposur selama 30–60 detik untuk lapisan resin 2 mm. PAC menggunakan xenon plasma bertekanan tinggi yang menyediakan intensitas tinggi dan waktu *curing* lebih cepat, tetapi juga menghasilkan panas tinggi yang berpotensi memengaruhi pulpa gigi (Fatin Hasanain & Hani Nassar, 2021). LED di sisi lain menjadi standar industri karena efisiensi tinggi, masa pakai lampu yang lama, konsumsi energi rendah, dan kemampuan memancarkan panjang gelombang yang disesuaikan dengan foto-inisiator seperti *camphorquinone* (Altaie et al., 2021). Generasi kedua LED bahkan memberikan *output* iradiansi yang setara atau lebih baik dibandingkan QTH tanpa menghasilkan panas berlebih (Toby Thomas et al., 2021).

LCUs modern menggunakan cahaya biru yang umumnya dianggap lebih aman daripada UV, namun penelitian menunjukkan adanya komponen spektrum biru intensitas tinggi (terutama 440–450 nm) yang dapat menyebabkan kerusakan retina jika terpapar langsung terlalu lama (Hind Saeed Alzahrani, 2024). Studi

populasi dan laboratorium menegaskan bahwa paparan langsung berulang dapat menyebabkan perubahan struktural di makula meski belum bermorfologi patologis (Nicole et al., 2021). Panduan klinis untuk mengurangi resiko tersebut merekomendasikan penggunaan pelindung mata dengan filter khusus biru serta mengikuti protokol penggunaan LCU yang tepat (American Dental Association, 2022).

2.9.2 *Light Curing Unit*

a. *Quartz–Tungsten Halogen (QTH)*

Unit QTH adalah generasi awal dari perangkat *curing* cahaya yang banyak digunakan dalam kedokteran gigi, bekerja dengan memanaskan filamen tungsten yang dikelilingi gas halogen untuk menghasilkan sinar putih spektrum lebar, khususnya rentang 400–500 nm yang sesuai dengan aktivasi fotoinisiator seperti *camphorquinone*. Kekurangan dari QTH terletak pada efisiensi energi yang tergolong rendah karena lebih banyak energi dilepaskan sebagai panas, sehingga unit memerlukan kipas atau sistem pendingin untuk menjaga suhu kerja (Strassler, 2022). Umur lampu QTH juga terbatas, rata-rata hanya bertahan antara 30 hingga 50 jam, dan kinerjanya menurun seiring waktu karena degradasi filter serta reflektor optik (Al-Shaafi et al., 2022). Waktu eksposur yang dibutuhkan untuk melengkapi polimerisasi resin hingga tebal 2 mm secara baik adalah antara 30 hingga 60 detik (Strassler, 2022).

b. *Plasma Arc Curing (PAC)*

Unit PAC memanfaatkan gas xenon yang diionisasi untuk menciptakan plasma cahaya intensitas tinggi dalam rentang spektrum luas.

Teknologi ini memungkinkan polimerisasi komposit dalam waktu sangat singkat, hanya 2 hingga 6 detik, untuk mencapai tingkat pengerasan klinis yang memadai (Chen et al., 2022). Kekurangan dari PAC terletak pada desain yang umumnya besar dan rumit karena memerlukan sistem pendingin tambahan serta biaya perangkat yang relatif tinggi (Lee & Park, 2023). Daya pancar tinggi yang dihasilkan juga cenderung menaikkan suhu pulpa secara signifikan, sehingga penggunaannya memerlukan kontrol suhu yang baik agar tidak merusak jaringan pulpa (Chang et al., 2021).

c. *Light-Emitting Diode (LED)*

Perangkat LED telah menjadi standar dalam *curing* unit modern karena efisiensi energi tinggi dan umur operasional yang panjang, sering mencapai ribuan jam masa pakai. LED generasi pertama memancarkan cahaya *monowave* pada sekitar 470 nm, yang sangat cocok untuk mengaktifasi fotoinisiator *camphorquinone* (Thomaidis et al., 2024). Generasi penerus dikenal sebagai LED *multipeak* atau *polywave*, menggabungkan berbagai tipe LED dalam satu perangkat, sehingga mampu mengaktifasi beberapa jenis fotoinisiator sekaligus (Zancope et al., 2023). Perangkat LED memiliki desain yang ringkas, mudah dibawa, dan menghasilkan panas yang sangat minim selama operasi (Thomaidis et al., 2024). Kekurangan dari perangkat ini adalah beberapa model LED mungkin masih memiliki keterbatasan dalam hal spektrum emisi dan tingkat irradiansi, yang berpotensi memengaruhi kedalaman dan kualitas polimerisasi komposit (Zancope et al., 2023).

d. *Argon Laser*

Argon laser memancarkan cahaya monokromatik pada panjang gelombang sekitar 488 nm, yang sangat sesuai untuk mengaktifkan fotoinisiator seperti *camphorquinone*. Teknologi ini mampu menghasilkan polimerisasi cepat dan merata karena distribusi energi yang sangat fokus. Kekurangan dari perangkat ini terletak pada ukuran yang umumnya besar dan berat karena memerlukan sistem pendingin air atau udara serta sumber daya listrik tiga fase. Daya penetrasi polimerisasinya juga terbatas hingga sekitar 2 mm, yang membatasi penggunaannya pada lapisan yang tipis. Biaya unit *argon laser* cukup tinggi dan penggunaannya memerlukan pelatihan khusus serta protokol keselamatan yang ketat, mengingat potensi risiko jaringan jika tidak ditangani dengan benar (Tessia & Michel, 2021).

2.9.3 Mekanisme *Light Curing*

Sumber utama radiasi dalam proses polimerisasi resin adalah lampu tungsten-halogen, yang memancarkan spektrum lebar namun hanya rentang cahaya biru (≤ 500 nm) yang efektif untuk mengaktifkan fotoinisiator seperti *camphorquinone* (Duman & Doğan, 2025). Cahaya seperti infra-merah dan panjang gelombang lain yang tidak diperlukan disaring untuk mencegah pemanasan berlebih dan meningkatkan efisiensi transfer energi (David C. Watts, 2023). Efektivitas polimerisasi tergantung pada intensitas cahaya dan durasi penyinaran, unit berkekuatan rendah (≤ 300 mW/cm²) membutuhkan hingga 240 detik, sementara unit berkekuatan tinggi (≥ 800 mW/cm²) hanya memerlukan 20–60 detik. Intensitas cahaya berkurang saat menyinari resin melalui enamel dan dentin, akibat penyerapan oleh struktur gigi, sehingga *oftentimes* waktu eksposur harus

diperpanjang dua hingga tiga kali lipat untuk mencapai tingkat pengerasan optimal (Shantun Malhotra, 2023).

Faktor seperti usia alat, adanya residu pada ujung serat optik, dan jarak antara sumber dan permukaan restorasi dapat memengaruhi intensitas yang diterima resin. Pemeriksaan berkala menggunakan radiometer sangat penting untuk memastikan *output* lampu masih sesuai standar klinis (Jenny et al., 2022). Panduan klinis juga menekankan penempatan ujung lampu sedekat mungkin, terutama pada area proksimal, untuk meminimalkan kehilangan intensitas cahaya dan mencegah pengerasan tidak merata (American Dental Association, 2022).

2.9.4 Kelebihan dan Kekurangan *Visible Light Curing*

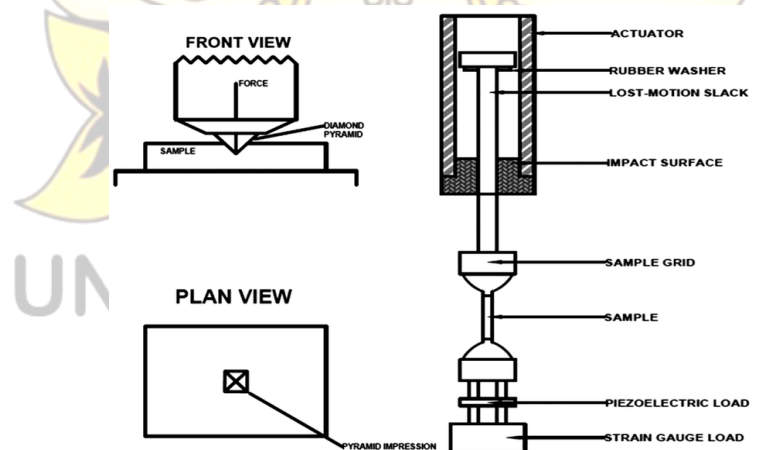
Penggunaan cahaya tampak dalam proses *curing* resin komposit memungkinkan penetrasi yang lebih dalam pada material dibandingkan sinar ultraviolet, sehingga menghasilkan polimerisasi yang lebih merata (Watts, 2023). Cahaya biru juga kurang terhambat oleh pigmen atau warna gelap pada restorasi, sehingga efektif mengeraskan komposit dengan variasi warna (Ferracane, 2024). Spektrum *visible light* dari segi keamanan memiliki energi yang lebih rendah daripada UV, sehingga lebih ramah terhadap jaringan biologis seperti mata dan kulit (Fatin Hasanain & Hani Nassar, 2021). Sistem ini juga memiliki efisiensi energi tinggi dan biaya operasional rendah karena umur lampu yang panjang dan minim kebutuhan pendinginan (Watts, 2023).

Kekurangan dari *curing* dengan *visible light* terletak pada kerentanannya terhadap gangguan dari cahaya eksternal seperti sinar matahari atau lampu ruangan, yang dapat mengganggu inisiasi fotopolimerisasi (Watts, 2023). Efektivitas *curing* juga menurun seiring jarak antara sumber dan komposit meningkat, hanya efektif

pada jarak dekat ($< 5 \text{ mm}$) (Ferracane, 2024). Teknologi ini juga sangat tergantung pada garis pandang langsung, permukaan restorasi yang tidak terpapar langsung dapat mengalami pengerasan yang tidak merata (Fatin Hasanain & Hani Nassar, 2021). Faktor-faktor ini menuntut perhatian ekstra dari operator untuk memastikan teknik aplikasi dan posisi *curing tip* tepat (Ferracane, 2024).

2.10 Vicker's Hardness Test

Pengujian kekerasan *Vickers* menjadi metode standar untuk menilai kekerasan mikro dari bahan restoratif gigi, termasuk resin komposit dan keramik. Metode ini menggunakan indenter berlian berbentuk piramida dengan sudut antar sisi 136° , yang ditekan ke permukaan material di bawah beban tertentu dalam durasi singkat. Permukaan sampel kemudian dianalisis menggunakan mikroskop optik beresolusi tinggi untuk mengukur lekukan diagonal yang terbentuk. Sudut dan geometri indenter memastikan lekukan simetris dan memungkinkan pengukuran akurat meski pada area kecil (Price & Sullivan, 2024).



Gambar 2. 3 *Vicker's Hardness Test*

Sumber: Heintze et al. (2021)

Diagram tersebut menunjukkan indenter berbentuk piramida empat sisi dengan sudut antara muka sebesar 136° . Beban diterapkan secara vertikal, menghasilkan lekukan pada permukaan sampel. Di bawah ini, lekukan yang terbentuk diukur dari panjang diagonalnya guna digunakan dalam perhitungan kekerasan *Vickers*. Gambar ini mencerminkan skema umum metode VHN yang akurat dan presisi (Heintze et al., 2021).

Hasil uji berbentuk lekukan bujur sangkar, dan panjang diagonalnya digunakan dalam rumus berikut untuk menentukan nilai kekerasan:

$$\text{VHN} = 1.854 \times P/d^2$$

Keterangan:

P = besar beban yang diberikan (dalam kilogram)

d = panjang rata-rata diagonal lekukan (dalam milimeter)

VHN = angka kekerasan Vickers dalam satuan kg/mm^2

Proses ini menghasilkan nilai kekerasan dalam kg/mm^2 yang mencerminkan resistensi permukaan terhadap deformasi plastis (Price & Sullivan, 2024). Pengujian ini sangat berguna untuk menilai efek pemasangan, polesan, atau paparan asam, karena memberikan hasil yang sensitif terhadap perubahan struktur mikro permukaan (Carrillo-Marcos et al., 2022).