

Pemilihan Material Termoplastik untuk *Aligner* Ortodonti: *Tinjauan Literatur*

Riandri C. Runizar¹, Miesje Karmiati Purwanegara¹, Retno Widayati¹, Sugeng Supriadi²

¹Departemen Ortodonti, Fakultas Kedokteran Gigi, Universitas Indonesia, Jakarta.

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta.

Corresponding Author: Riandri C. Runizar,

Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Indonesia, Program Doktor.

(email: riandri.cr@gmail.com)

ABSTRAK

Pendahuluan: *Aligners* atau *clear removable appliances* merupakan alternatif alat ortodonti selain alat cekat untuk para pasien yang mengutamakan estetika dan kebersihan rongga mulut. *Aligner* terbuat dari polimer termoplastik yang dipanaskan di dalam unit *thermoforming*, kemudian dicetak ke model gigi pasien. *Aligner* termoplastik akan menghantarkan gaya ortodonti. Oleh karena itu, makalah ini akan mengulas beberapa material yang sering digunakan untuk *aligner*, difokuskan pada properti mekanik, fisik dan kimia sesuai dengan publikasi pustaka terkini. **Sari Pustaka:** Pengumpulan data untuk studi pustaka dilakukan melalui pencarian elektronik dari database: PubMed, Embase dan Scopus. Termasuk dalam inklusi adalah penelitian *in vivo*, *in vitro*, uji klinik dan studi pustaka yang dipublikasikan antara tahun 2012 - 2022. Seluruh referensi ditelaah berdasarkan *PRISMA guidelines*. **Diskusi:** Material yang sering digunakan untuk *aligner* adalah polietilen tereftalat glikol (PETG), poliuretan termoplastik (TPU) dan material berlapis seperti *SmartTrack* dari Invisalign. *Aligner* dari bahan termoplastik harus cukup kaku untuk menghasilkan gaya ortodonti, namun tetap fleksibel sehingga mudah dipasang dan dilepaskan dari rongga mulut. Analisis terhadap properti mekanis, fisik dan kimia akan ditelaah berdasarkan hasil inklusi studi pustaka ini. **Kesimpulan:** Pemahaman terhadap material termoplastik *aligner* dibutuhkan sebagai dasar pemilihan material yang optimal dari aspek estetika dan kemampuannya menghasilkan gaya konstan dan ringan untuk mencetuskan respon biologis yang menginisiasi pergerakan ortodonti.

Kata kunci: *clear removable appliances*; material termoplastik; properti material.

PENDAHULUAN

World Health Organization (WHO) menyatakan bahwa kelainan letak gigi atau maloklusi menduduki posisi prevalensi ketiga tertinggi setelah karies dan penyakit periodontal.¹ Maloklusi umumnya disebabkan oleh kelainan pertumbuhan dan perkembangan wajah dan gigi; kelainan fungsi otot wajah di antaranya akibat kesalahan cara menelan atau mengunyah makanan; atau karena kebiasaan buruk seperti bernafas melalui mulut.² Oleh karenanya maloklusi mempengaruhi kualitas hidup dan estetika wajah.³

Alat yang digunakan untuk merawat maloklusi dapat berupa alat cekat atau alat lepasan. Alat ortodonti cekat atau braket ortodonti umumnya digunakan untuk kasus maloklusi ringan sampai berat sedangkan alat ortodonti lepasan digunakan untuk kasus maloklusi ringan sampai sedang. Alat lepasan lebih unggul dari alat cekat dalam hal kebersihan karena dapat dilepas saat makan atau menyikat gigi sehingga sangat

menguntungkan bagi kebersihan dan kesehatan gigi dan mulut. *Aligner* merupakan inovasi alat ortodonti lepasan terkini, yang berkembang pesat seiring dengan kemajuan teknologi komputer dan manufaktur. *Aligner* terbuat dari material termoplastik yang transparan sehingga menjadi alat ortodonti yang diminati oleh para pasien yang mengutamakan kenyamanan dan estetika.^{4,5}

Proses manufaktur *aligner* diawali dengan *intra oral scanning* atau *model 3D scanning*. Rencana pergerakan gigi dibuat tahap demi tahap sebesar 0.25 mm *tipping* atau 2° derotasi dengan menggunakan *computer-aided design (CAD) software* terhadap hasil *scanning*.⁶ Setiap tahap pergerakan gigi (*set-up model*) dicetak dengan metode cetak 3 dimensi (*3D-printing*). Lembaran material termoplastik dipanaskan agar melunak dan kemudian dilakukan proses penekanan ke atas udara (*thermoforming*) pada setiap *set-up model*.⁷

Efektifitas suatu alat ortodonti bergantung dari kemampuan alat menghantarkan gaya yang optimal sehingga gigi dapat bergerak. Efektifitas *aligner* bergantung pada perencanaan *set-up* model, desain *aligner*, properti atau sifat material, proses manufaktur serta ketebalan lembaran material.⁸⁻¹⁰ Saat ini, di pasaran sudah banyak sekali produk *aligner* yang ditawarkan sehingga timbul masalah bagaimana menilai kualitas material *aligner*. Para dokter gigi perlu mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang properti material dari *aligner* ortodonti. Tujuan dari *literature review* ini adalah mengulas beberapa material yang sering digunakan untuk *aligner*, difokuskan pada properti mekanik, fisik dan kimia sesuai dengan publikasi pustaka terkini.

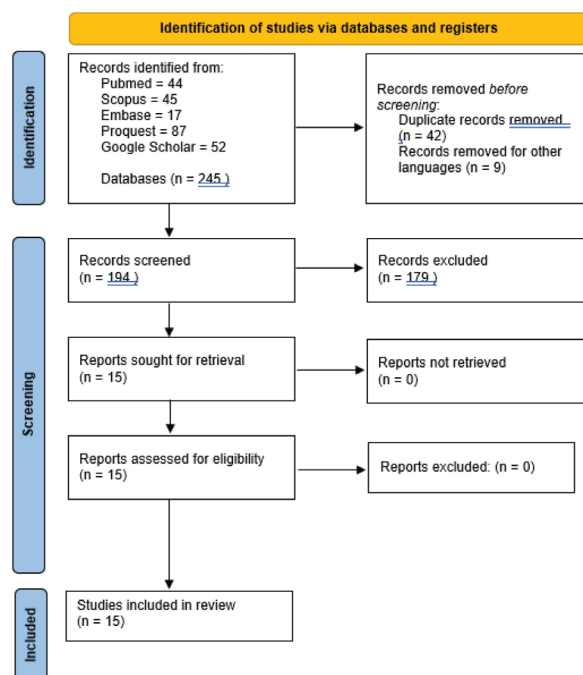
LITERATURE REVIEW

Pencarian jurnal tentang material termoplastik untuk *aligner* ortodonti dilakukan melalui *database* Pubmed, Scopus, Embase, Proquest dan Google Scholar. pada bulan Oktober-Desember 2022. Istilah yang dimasukkan pada kotak pencarian adalah *clear aligner appliance, thermoplastic material properties, character, performance*. Pencarian manual juga dilakukan dari referensi jurnal yang ditemukan. Jurnal diseleksi berdasarkan tahun publikasi yaitu antara tahun 2012 sampai dengan 2022. (Gambar 1).

Material termoplastik

Material *aligner* adalah polimer termoplastik yang biokompatibel dan mudah dibentuk jika dipanaskan. Polimer terdiri monomer-monomer yang berikatan satu sama lain melalui ikatan kimia. Komposisi kimia monomer dan berat makromolekul suatu polimer akan menentukan properti atau karakter material.¹¹ Properti mekanis dan fisik polimer termoplastik juga dipengaruhi oleh susunan rantai. Susunan rantai polimer yang kusut, tidak beraturan disebut berstruktur amorfus sedangkan susunan rantai yang beraturan disebut berstruktur kristalin. Umumnya, material termoplastik berstruktur semikristalin yang berarti memiliki bagian amorfus dan bagian kristalin. Molekul pada polimer amorfus tidak padat sehingga bersifat lebih lunak, lebih transparan, tidak mudah mengerut dan resisten terhadap beban. Sifat polimer kristalin lebih keras, lebih opak, translusen dan lebih tahan terhadap bahan kimia.^{11,12}

Pencarian di *database* mengungkapkan bahwa jenis material termoplastik yang banyak digunakan adalah termoplastik poliuretan (TPU), polyester dan polietilen tereftalat glikol (PETG).¹³ Material lain seperti polipropilen, polikarbonat, etilen vinil asetat dan polivinil klorida disebutkan pula dalam literatur, namun umumnya digunakan sebagai bahan campuran.¹⁴ Perusahaan *aligner* komersial biasanya memproduksi material sendiri dengan mencampur atau



Gambar 1. PRISMA Flow Diagram

menambah material tertentu ke dalam material dasar. Komposisi pencampuran bertujuan untuk mendapatkan sifat material yang lebih unggul.^{15,16} Salah satu contoh adalah material SmartTrack yang dikembangkan dan diproduksi oleh Invisalign.

PETG merupakan kopolimer dari polietilen tereftalat (PET) dengan properti mekanik yang baik, mudah dibentuk, kualitas optik baik, resisten terhadap *fatigue* dan berdimensi stabil. Gugus glikol (G) ditambahkan pada PET untuk mengurangi sifat semikristalin, namun tidak mengubah properti mekanik. TPU adalah material termoplastik yang banyak digunakan di industri karena sangat tahan abrasi, elastis, cukup transparan dan kuat geser (*high shear strength*).^{17,18} SmartTrack adalah material termoplastik poliuretan aromatik/copolyester berlapis (*multi-layer*). SmartTrack terdiri dari 67% TPU, 82% PET, dan 73% politrimetil eksanetilen tereftalanid.¹⁵ Berdasarkan tampilan pada spektroskop, SmartTrack lebih homogen, struktur kristalin rendah, lentur namun cukup keras dan mudah berubah menjadi plastis.¹⁵

Properti material *aligner*

Ditinjau dari aspek mekanik, *aligner* harus elastis saat diberi beban tetapi cukup lentur sehingga mudah dilepas pasang dan cukup kaku untuk mampu menghantarkan gaya ortodonti. *Aligner* harus cukup keras untuk menahan gaya oklusal sehingga tidak mudah sobek. *Aligner* tidak boleh terlalu fleksibel karena akan menyebabkan kesulitan dalam mengendalikan pergerakan gigi ortodonti. Dari aspek

fisik dan kimia, *aligner* harus transparan dan warnanya stabil, tidak berbau atau berasa, tahan terhadap suhu dan zat kimia dan tidak menyerap terlalu banyak air pada saat pemakaian di dalam mulut.¹⁸

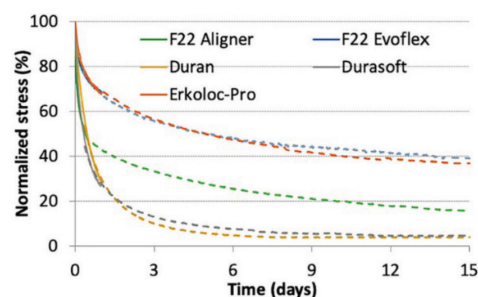
Kebanyakan produk material di pasaran menyertakan *data sheet* properti material, namun data tersebut perlu diverifikasi dengan merujuk kepada jurnal penelitian. Material termoplastik mengalami proses manufaktur berupa pemanasan, pencetakan, dan pendinginan sebelum kemudian terpapar dengan lingkungan di dalam rongga mulut. Faktor-faktor tersebut akan mempengaruhi properti material termoplastik.¹⁸

Properti mekanik

Tingkat elastisitas atau tingkat kekakuan suatu material termoplastik ditentukan oleh nilai modulus elastisitas. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas maka semakin kaku material tersebut. Modulus elastisitas dapat diuji dengan uji tarik. Ryu *et al.* (2018) melakukan pengujian terhadap PETG (Duran dan eCaligner) dan copolyester (Essix A+ dan Essix ACE).¹⁹ Ketebalan spesimen berbeda-beda, yaitu 0,5 mm, 0,75 mm dan 1,0 mm. Penelitian ini menyatakan bahwa semakin tebal material semakin besar pula gaya yang dihasilkan. Namun ketebalan dan modulus elastisitas semua jenis material termoplastik menurun setelah mengalami pemanasan pada proses *thermoforming*.¹⁹

Penelitian oleh Tamburrino *et al.* (2020) membandingkan properti mekanis PET (Biolon), PETG (Duran), TPU (Zendura) dengan ketebalan 0,75 mm atau 1,0 mm. Penelitian ini mengevaluasi modulus elastisitas sebelum dan setelah proses *thermoforming*; kemudian setelah direndam saliva buatan; dan membandingkannya dengan nilai-nilai yang terdapat pada *data sheet* yang dibuat oleh pabrik. Modulus elastisitas PETG (Duran) menurut *data sheet* adalah 2200 MPa, namun pengukuran mandiri oleh peneliti sebelum *thermoforming* adalah 1531 MPa, setelah *thermoforming* naik menjadi 1693 MPa kemudian turun menjadi 1368 MPa setelah direndam saliva buatan. Fenomena yang sama terjadi pada TPU (Zendura). Pabrik tidak memberikan *data sheet*. Pengukuran mandiri sebelum *thermoforming* adalah 1478 MPa, setelah *thermoforming* naik menjadi 1730 MPa dan turun kembali 1466 MPa setelah direndam saliva buatan. Modulus elastisitas PET (Biolon) dari nilai *data sheet* (2050 MPa), menurun sebelum dan setelah *thermoforming* (1556 MPa dan 1447 MPa), kemudian naik kembali (1519 MPa) setelah direndam saliva buatan. Penelitian ini menunjukkan peningkatan modulus elastisitas setelah *thermoforming* kemudian penurunan modulus elastisitas setelah direndam saliva buatan, kecuali pada PET (Biolon) yang mengalami sedikit penurunan. Hasil ini bertentangan dengan penelitian Ryu *et al.* (2018).¹⁸

Modulus elastisitas SmartTrack dilaporkan oleh Fang *et al.* (2020) berdasarkan potongan specimen



Gambar 2. Kurva relaksasi stres.²²

dari *aligner* Invisalign yang belum digunakan dan potongan specimen dari *aligner* yang sudah digunakan selama 20-22 jam per hari dalam jangka waktu dua minggu. Uji tarik pertama menghasilkan nilai modulus elastisitas 842 MPa, sedangkan uji tarik kedua setelah pemakaian dua minggu mengalami penurunan menjadi 806 MPa. Penurunan tersebut dinilai tidak signifikan. Nilai modulus elastisitas SmartTrack sebelum dan setelah *thermoforming* tidak dapat dilakukan karena proses manufaktur dilakukan di pabrik tertutup.²⁰

Cara kerja *aligner* adalah mendorong gigi ke posisi target. Pada saat pemasangan, *aligner* mengalami deformasi bentuk dan berusaha untuk kembali ke bentuknya semula. Akibatnya gigi akan terdorong dan bergerak ke posisi target. *Aligner* menyerap energi karena mendapatkan beban elastis ("loaded") dan kemudian mentransfer energi tersebut ke gigi target ("unloaded"). *Aligner* yang mendapatkan beban elastis akan mengalami deformasi konstan sehingga gaya yang dihantarkan menurun tajam seiring dengan waktu. Fenomena ini disebut relaksasi stres.²¹

Relaksasi stres diteliti oleh Albertini *et al.* (2022) terhadap lima jenis material *aligner* (F22 Evoflex [TPU], F22 Aligner [TPU], Durasoft [TPU/PC], Erkoloc-Pro [PETG/TPU] and Duran [PETG]). Tiga specimen, yaitu Duran, F22 Aligner dan F22 Evoflex, merupakan polimer *single-layer*. Dua specimen, yaitu Erkoloc-Pro dan Durasoft, merupakan polimer *double-layer*. Relaksasi stres dievaluasi dengan menghitung persentase penurunan stres (*normalized stress percent*) yang diukur pada jam ke 8, 16 dan 24 terhadap nilai maksimum stres.^{20,22} Selanjutnya, evaluasi relaksasi stres diobservasi selama 15 hari.

Kurva relaksasi stres material termoplastik menggambarkan terjadinya penurunan stres yang tajam beberapa jam setelah *aligner* dipasang. (Gambar 2). Semua material mengalami relaksasi stres pada 8 jam pertama kemudian menurun menurun pada jam ke 16 dan 24.^{21,22} Selanjutnya, kurva relaksasi stres mencapai fase datar (*plateau*) selama periode uji 15 hari *in vitro*. Nilai stres F22 Evoflex dan Erkoloc-Pro masing-masing bertahan pada 39,2% dan 36,9%. Nilai stres terendah adalah material Duran dan Durasoft yaitu 0,5 MPa (4,6%) dan 0,4 MPa (3,9%).²²

SmartTrack (Invisalign) juga mengalami relaksasi stres, namun menurut Fang *et al.* (2020) penurunan stres yang terjadi tidak signifikan. Relaksasi stres tersebut berdasar uji regang pada spesimen SmartTrack setelah dua jam pada 0-minggu dan 2-minggu setelah pemakaian di dalam mulut dengan hasil $19.89 \pm 2.25\%$ dan $15.91 \pm 6.04\%$.²⁰

Properti fisik dan kimia

Proses manufaktur material termoplastik diawali dengan pemanasan di atas suhu transisi gelas sehingga meleleh dan dapat dicetak pada model menjadi bentuk *aligner* sesuai anatomis gigi. Setelah mengalami proses *thermoforming*, *aligner* akan lebih tipis dibandingkan dengan lembaran material termoplastiknya.^{23,24} Struktur amorfus polimer sebagian berubah menjadi kristalin pada saat proses pendinginan, akibatnya transparansi *aligner* berkurang, namun kemampuan menyerap air bertambah. Kesimpulan tersebut disampaikan oleh Ryu *et al.* (2018) setelah meneliti material PETG (Duran dan eClinger) dan copolyester (Essix A+ dan Essix ACE).¹⁹

Properti fisik dan kimia *aligner* termoplastik akan berubah pada saat pemakaian di dalam mulut. Daniele *et al.* (2022), mengungkapkan bahwa dimensi *aligner* tidak stabil karena menyerap air, saliva dan zat pewarna. Penelitian dilakukan terhadap *aligner* dari material PETG, PU dan campuran PETG/PU dengan tingkat kristalinitas yang berbeda-beda. Spesimen direndam dalam 4 *water baths* yang masing-masing berisi larutan saliva buatan, kopi, *red wine* dan nikotin, direndam selama 14 hari pada suhu 37°C. Nilai transparansi diukur berdasarkan *National Bureau of Standards (NBS)* yang menetapkan bahwa variasi warna > 1.5 didefinisikan sebagai terdapat perubahan warna yang nyata (*noticeable*). Jika nilai NBS lebih dari 12 ke atas maka terjadi perubahan warna yang sangat besar. Sebelum diberi perlakuan, material PETG adalah material yang paling transparan. Setelah direndam, *aligner* PETG dan *aligner* berbahan dasar PU mengalami perubahan warna yang berkisar antara 1,5-3. SmartTrack material yang berbahan dasar PU mengalami perubahan warna tertinggi dengan nilai 35.²⁵ Hasil serupa dilaporkan oleh Bernard *et al.* (2020) bahwa Invisalign (SmartTrack/PU-based) mengalami perubahan warna paling nyata dibandingkan spesimen ClearCorrect (PU-based) dan Minor Tooth Movement (Copolyester) setelah 12 jam dan 7 hari direndam dalam kopi, *red wine* dan teh hitam. Pewarnaan kopi dan *red wine* tersebut tidak dapat dihilangkan dengan larutan pembersih (*sonic cleaner and stain remover tablets*).²⁶

DISKUSI

PETG, TPU dan SmartTrack merupakan material termoplastik yang paling banyak dipublikasi. Material *aligner* yang berbahan dasar PETG unggul karena lebih transparan, sedangkan yang berbahan dasar TPU

unggul karena lebih lentur. SmartTrack merupakan material *multi-layer* berbahan dasar TPU yang ditambah dengan PETG dan politrimetil eksanetilen tereftalanide.¹⁵ SmartTrack menjadi translusen dibandingkan dengan PETG, namun lebih fleksibel karena mengandung TPU. Material Invisalign ini, beradaptasi lebih baik terhadap morfologi gigi, *aligner* menjadi lebih cepat, tetapi masih membentuk gap antara *aligner* dan gigi di bagian posterior.^{6,15,23,27}

Karakteristik material dipengaruhi oleh proses manufaktur. Menurut Ryu *et al.* (2018), setelah proses *thermoforming* elastisitas semua material akan menurun, sedangkan menurut Tamburino *et al.* (2020) *thermoforming* menyebabkan elastisitas meningkat. Namun penelitian Dalaie *et al.* (2021) dan Golkhani *et al.* (2022) mendukung bahwa terjadi peningkatan modulus elastisitas setelah *thermoforming*.^{18,19,28,29} Perbedaan ini mungkin saja terjadi karena metode penelitian yang berbeda dari aspek komposisi material, bentuk spesimen, alat *thermoforming*, suhu, waktu pemanasan (*heating time*) dan pendinginan (*cooling time*). (Tabel 1).

Perubahan modulus elastisitas terjadi karena pada saat lembaran termoplastik dipanaskan, struktur amorfus rantai polimer bergerak dan berubah menjadi kristalin.¹⁹ Selain panas, proses kristalisasi tersebut juga dipengaruhi oleh tersusunnya rantai molekul saat material meregang selama proses vakum pada spesimen atau model. Kristalisasi berlanjut sampai proses pendinginan selesai.¹⁸ Dengan demikian bagian struktur kristalin pada *aligner* lebih banyak dibandingkan dengan lembaran material dasarnya. Oleh karena itu *aligner* menjadi lebih kaku.³⁰ Selama di dalam mulut, modulus elastisitas kembali menurun karena *aligner* menyerap air. Air yang terserap akan menurunkan temperatur transisi gelas (*Tg*) yang berdampak pada turunnya modulus elastisitas. Air akan menjadi zat aditif (*plasticizer*) yang masuk diantara monomer-monomer menyebabkan kekuatan ikatan intermolekuler menjadi melemah.¹⁸

Relaksasi stres yang terjadi pada semua material termoplastik dapat diilustrasikan kurva yang serupa. (Gambar 1). Artinya, apapun jenis material *aligner*, akan mengalami penurunan gaya yang tajam beberapa jam setelah pemakaian dan kemudian mendatar sampai 15 hari periode waktu penelitian.²² Berbeda dengan archwire pada braket yang mengeluarkan gaya ringan dan konstan dalam rentang waktu 1-2 bulan. Material termoplastik yang ideal adalah yang memiliki kurva relaksasi stres tidak terlalu curam dan bertahan datar selama pemakaian *aligner*.⁶ Adanya relaksasi stres menjadi dasar pertimbangan bahwa satu *aligner* sebaiknya digunakan selama dua minggu. Dengan demikian diperoleh gaya ringan dan konstan agar terjadi respon biologis yang menstimulasi pergerakan gigi ortodonti.

Tabel 1. . Perbandingan Properti Material Aligner. Nilai properti semakin besar dari kiri ke kanan.

Perbandingan Properti Material Aligner					
Modulus Elastisitas:	TPU	<	SmartTrack	<	PETG
Relaksasi Stres:	TPU	<	SmartTrack	<	PETG
Optik (Transparansi):	TPU	<	SmartTrack	<	PETG
Keterserapan Air:	PETG	<	TPU	<	SmartTrack
Keterserapan Warna:	PETG	<	TPU	<	SmartTrack

Properti optik termoplastik yang paling baik adalah PETG atau *PETG-based material*. Sementara TPU-based material yaitu SmartTrack sangat mudah menyerap air dan zat warna.²⁵ Menurut Daniele *et al.* (2022), perubahan warna *aligner* dipengaruhi oleh derajat kristalinitas yang tinggi, komposisi kimia dan proses *thermoforming*.²⁵ Poliuretan sendiri merupakan material yang porus. Interaksi antara air dan poliuretan dipermudah dengan adanya unsur -NHCOO- yang bersifat hidrofilik.²⁶ Kemungkinan perubahan warna *aligner* ini perlu disampaikan kepada para pasien yang peduli akan estika agar mereka menghindari minuman berwarna selama menggunakan *aligner*.

KESIMPULAN

Pemahaman terhadap material termoplastik *aligner* dibutuhkan sebagai dasar pemilihan material yang optimal dari aspek estetika dan kemampuannya menghasilkan gaya konstan dan ringan untuk menginisiasi pergerakan gigi ortodonti. Properti material termoplastik bergantung kepada komposisi dan struktur kimia polimer. Setelah proses manufaktur material dan penggunaan *aligner* di dalam mulut, akan terjadi perubahan elastisitas, penurunan ketebalan, deformasi bentuk, relaksasi stres, penurunan transparansi dan perubahan warna *aligner*.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan yang terkait.

KEPUSTAKAAN

- Singh VP, Sharma A. Epidemiology of Malocclusion and Assessment of Orthodontic Treatment Need for Nepalese Children. *Int Sch Res Notices*. 2014;2014:1–4.
- Onofrio LD. Oral dysfunction as a cause of malocclusion. 2019;22(December 2018):43–8.
- Sun L, Wong HM, McGrath CP. Relationship Between the Severity of Malocclusion and Oral Health Related Quality of Life: A Systematic Review and Meta-analysis. *Oral Health Prev Dent* [Internet]. 2017 [cited 2022 Apr 21];15(6):503–17. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28944350/>
- Alansari RA, Faydhi DA, Ashour BS, Alsaggaf DH, Shuman MT, Ghoneim SH, et al. Adult perceptions of different orthodontic appliances. Patient Prefer Adherence [Internet]. 2019;13:2119–28. Available from: <http://doi.org/10.2147/PPA.S234449>
- Pacheco-Pereira C, Brandelli J, Flores-Mir C. Patient satisfaction and quality of life changes after Invisalign treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* [Internet]. 2018;153(6):834–41. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.10.023>
- Morton J, Derakhshan M, Kaza S, Li C. Design of the Invisalign system performance. *Semin Orthod* [Internet]. 2017;23(1):3–11. Available from: <http://dx.doi.org/10.1053/j.sodo.2016.10.001>
- Jindal P, Juneja M, Siena FL, Bajaj D, Breedon P. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2019;156(5):694–701.
- Iliadi A, Koletsi D, Eliades T. Forces and moments generated by aligner-type appliances for orthodontic tooth movement: A systematic review and meta-analysis. *Orthod Craniofac Res*. 2019;22(4):248–58.
- Kaur H, Khurelbaatar T, Mah J, Heo G, Major PW, Romanyk DL. Investigating the role of aligner material and tooth position on orthodontic aligner biomechanics. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* [Internet]. 2023 Jan 1 [cited 2022 Dec 6];111(1):194–202. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jbm.b.35145>
- Gao L, Wichelhaus A. Forces and moments delivered by the PET-G aligner to a maxillary central incisor for palatal tipping and intrusion. *Angle Orthodontist*. 2017;87(4):534–41.
- Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, et al. Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioact Mater*. 2023;22(September 2022):384–403.
- Macri M, Murmura G, Varvara G, Traini T, Festa F. Clinical Performances and Biological Features of Clear Aligners Materials in Orthodontics. *Front Mater*. 2022;9(February):1–10.
- Putrino A, Barbato E, Galluccio G. Clear aligners: Between evolution and efficiency—a scoping review. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(6):1–16.
- N.Zhang, Y.Bai, X.Ding et al. Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics(No Title). *Dental Materials Jorنال*. 2011;30(6):954–9.
- Condo R, Luca P, Cerroni L, Pasquantonio G,

- Lagana G, Pecora A, et al. Mechanical properties of “two generations” of teeth aligners: Change analysis during oral permanence. *Dent Mater J*. 2018 Sep 27;37(5):835–42.
16. Hartshorne J, Wertheimer MB. Emerging insights and new developments in clear aligner therapy: A review of the literature. *AJO-DO Clinical Companion* [Internet]. 2022;2(4):311–24. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.xaor.2022.04.009>
17. Alexandropoulos A, Jabbari YS al, Zinelis S. Chemical and mechanical characteristics of contemporary thermoplastic orthodontic materials. 2015;31(2):165–70.
18. Tamburrino F, D'Antò V, Bucci R, Alessandri-Bonetti G, Barone S, Razionale AV. Mechanical properties of thermoplastic polymers for aligner manufacturing: In vitro study. *Dent J (Basel)*. 2020;8(2).
19. Ryu JH, Kwon JS, Jiang HB, Cha JY, Kim KM. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. *Korean J Orthod*. 2018;48(5):316–25.
20. Fang D, Li F, Zhang Y, Bai Y, Wu BM. Changes in mechanical properties, surface morphology, structure, and composition of Invisalign material in the oral environment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* [Internet]. 2020;157(6):745–53. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.05.023>
21. Lombardo L, Martines E, Mazzanti V, Arreghini A, Mollica F, Siciliani G. Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study. *Angle Orthodontist* [Internet]. 2017 [cited 2022 Dec 7];87(1):11–8. Available from: http://meridian.allenpress.com/angle-orthodontist/article-pdf/87/1/11/1399465/113015-813_1.pdf
22. Albertini P, Mazzati V, Mollica F, Pellitteri F, Palone M, Lombardo L. Stress relaxation properties of five orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study. *MDPI bioengineering*. 2022;9(1):349.
23. Mantovani E, Parrini S, Coda E, Cugliari G, Scotti N, Pasqualini D, et al. Micro computed tomography evaluation of Invisalign aligner thickness homogeneity. [cited 2022 Oct 17]; Available from: <http://meridian.allenpress.com/angle-orthodontist/article-pdf/91/3/343/2818857/i0003-3219-91-3-343.pdf>
24. Lombardo L, Palone M, Longo M, Arveda N, Nacucchi M, de Pascalis F, et al. MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: an in-vitro study. *Prog Orthod* [Internet]. 2020 Dec 1 [cited 2022 Jan 17];21(1):1–12. Available from: <https://progressinorthodontics.springeropen.com/articles/10.1186/s40510-020-00312-w>
25. Daniele V, Macera L, Taglieri G, Spera L, Marzo G, Quinzi V. Color stability, chemico-physical and optical features of the most common petg and pu based orthodontic aligners for clear aligner therapy. *Polymers (Basel)*. 2022 Jan 1;14(1).
26. Bernard G, Rompré P, Tavares JR. Colorimetric and spectrophotometric measurements of orthodontic thermoplastic aligners exposed to various staining sources and cleaning methods. *Head Face Med*. 2020;1–11.
27. Mantovani E, Castroflorio E, Rossini G, Garino F, Cugliari G, Deregibus A, et al. Scanning electron microscopy evaluation of aligner fit on teeth. *Angle Orthodontist*. 2018;88(5):596–601.
28. Dalaie K, Fatemi SM, Ghaffari S. Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging. *Prog Orthod* [Internet]. 2021;22:15. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00362-8>
29. Golkhani B, Weber A, Keilig L, Reimann S, Bourauel C. Variation of the modulus of elasticity of aligner foil sheet materials due to thermoforming. *Journal of Orofacial Orthopedics* [Internet]. 2022 Jul 1 [cited 2022 Sep 26];83(4):233–43. Available from: <https://remote-lib.ui.ac.id:2218/article/10.1007/s00056-021-00327-w>
30. Anusavice KJ. *Phillips' Science of Dental Materials* (Anusavice Phillip's Science of Dental Materials). Elsevier Saunders [Internet]. 2003 [cited 2022 Feb 3];12:588. Available from: <http://www.amazon.com/Phillips-Science-Dental-Materials-Anusavice/dp/0721693873>