

Perbandingan Konstanta Elastisitas Virus HIV-1 Matang dan HIV-1 Belum Matang

Luh Putu Budi Yasmini^{1*}, M.R. Fauzi², Nurfa Risha³, I Gede Aris Gunadi⁴ 

^{1,2,3,4} Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received March 22, 2022

Revised March 29, 2022

Accepted Agustus 14, 2022

Available online October 25, 2022

Kata Kunci:

Virus, Konstanta Elastisitas, HIV-1 (Matang), HIV-1 (Belum Matang)

Keywords:

Virus, Elasticity Constants, HIV-1 (Mature), HIV-1 (Immature)



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Virus pada aspek fisis masih sangat menarik untuk dikaji berdasarkan konsep Fisika. Salah satu ciri virus adalah kekakuan cangkang virus tersebut. Dalam tinjauan selanjutnya, cangkang virus dapat diasumsikan sebagai pegas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis akurasi dan wawasan mengenai kekakuan cangkang virus secara teoretik dengan menggunakan penyelesaian persamaan Michell. Dalam artikel ini, dikaji nilai kekakuan cangkang virus secara teoretik melalui metode analitik dan simulasi dengan mengkaji berbagai sumber pustaka terkait. Metode analisis didasarkan pada teori *plate & shell*, serta dibahas mengenai suatu metode analitik lainnya, yakni dengan menggunakan persamaan Michell. Metode simulasi didasarkan pada metode *finite element analysis* (FEA). Dikaji konstanta elastisitas dua jenis virus, yakni virus HIV-1 (matang) dan HIV-1 (belum matang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa virus HIV-1 (matang) memiliki konstanta elastisitas yang lebih kecil bila dibandingkan dengan konstanta elastisitas virus HIV-1 (belum matang). Hal tersebut sangat terkait dengan karakteristik virus tersebut, yakni ukuran, ketebalan, dan sifat intrinsik virus. Virus dengan ketebalan cangkang yang lebih kecil memiliki konstanta elastisitas yang lebih kecil, sehingga lebih efisien untuk menginfeksi sel inang dibandingkan dengan virus yang memiliki konstanta elastisitas yang lebih besar.

ABSTRACT

Viruses on the physical aspect are still very interesting to study based on the concept of physics. One of the characteristics of the virus is the rigidity of the viral shell. In the following review, the viral shell can be assumed to be a spring. The purpose of this study was to analyze the accuracy and insight into the theoretical rigidity of the viral shell by using the solution of the Michell equation. In this article, the theoretical value of virus shell stiffness is studied through analytical and simulation methods by reviewing various related literature sources. The analytical method is based on plate & shell theory, and another analytical method is discussed, namely by using the Michell equation. The simulation method is based on the finite element analysis (FEA) method. The elasticity constants for two types of viruses were studied, namely HIV-1 (ripe) and HIV-1 (immature) viruses. The results showed that HIV-1 (ripe) virus had a smaller elasticity constant when compared to the elasticity constant of HIV-1 (immature) virus. This is closely related to the characteristics of the virus, namely the size, thickness, and intrinsic nature of the virus. Viruses with a smaller shell thickness have a smaller elasticity constant, so they are more efficient at infecting host cells than viruses with a larger elasticity constant.

1. PENDAHULUAN

Virus merupakan suatu agen infeksi berukuran mikroskopik yang memperbanyak dirinya di dalam sel suatu organisme yang bertujuan untuk bertahan hidup dengan cara memperbanyak dirinya (Gelderblom, 1996; Sufiawati et al., 2021). Virus terdiri dari dua jenis, yaitu *enveloped* dan *non-enveloped viruses*. Contoh virus yang termasuk kategori *enveloped* adalah virus influenza, *Hepatitis B Virus* (HBV), dan *Human Immunodeficiency Virus* (HIV), sedangkan yang termasuk kelompok *non-enveloped* adalah *Cowpea Chlorotic Mottle Virus* (CCMV), dan *Minute Virus of Mice* (MVM). Virus yang terbungkus dengan lapisan tambahan, yakni: *enveloped virus*, berperan penting dalam tahap awal infeksi yang dilakukan oleh virus (Eshaghi et al., 2020; Scoca & Di Nunzio, 2021). Hal menarik mengenai virus adalah cangkangnya, yakni cangkang virus yang komposisinya terdiri dari protein yang disebut sebagai kapsid berfungsi sebagai pelindung genom *Ribonucleic Acid* (RNA) maupun *Deoxyribonucleic Acid* (DNA). Setiap virus memiliki lapisan kapsid akan tetapi tidak semua virus memiliki suatu pelindung tambahan lainnya yang disebut sebagai lapisan lipid.

Salah satu hal yang unik dan menarik terkait sifat mekanik yang dimiliki virus, yaitu sifat elastisitas virus dan hal ini masih sangat menarik untuk dikaji baik secara eksperimen maupun secara teoretik (Bruinsma et al., 2021; Kondylis et al., 2019; Lošdorfer Božič et al., 2013). Elastisitas merupakan suatu kemampuan sebuah benda untuk menahan suatu pengaruh yang menyimpang, dan tentunya untuk kembali

*Corresponding author.

E-mail addresses: budi.yasmini@undiksha.ac.id (Luh Putu Budi Yasmini)

menuju ukuran, dan bentuk semula ketika pengaruh suatu gaya tersebut ditiadakan. Sedangkan kekakuan ialah sejauh mana suatu benda menahan suatu deformasi sebagai respon (tanggapan) terhadap gaya terkonsentrasi yang diberikan terhadap benda tersebut. Semakin elastis suatu benda, semakin tidak kaku benda tersebut (Atanackovic & Guran, 2000; Sufiawati et al., 2021). Setiap jenis virus, yakni *enveloped* dan *non-enveloped*, memiliki sifat intrinsik elastisitas dan kekakuan yang berbeda-beda, yang dapat diketahui dengan menggunakan *Atomic Force Microscopy* (AFM) (Malkin et al., 2001; Mateu, 2012). Dengan menggunakan AFM, ukuran virus dan sifat mekanik virus dapat diukur. AFM mengukur nilai kekakuan atau konstanta pegas virus. Hal ini sejalan dengan yang telah dilakukan oleh (Kol et al., 2007) yang mengkaji bagaimana sifat fisis atau elastisitas virus HIV selama siklus hidupnya dari yang belum matang hingga menjadi virus yang matang yang dilakukan melalui eksperimen dengan menggunakan AFM.

Penelitian mengenai sistem mekanis virus tentunya bermanfaat untuk mengetahui dan memahami sifat yang dimiliki virus. Kekakuan cangkang virus berkaitan erat dengan penginfeksi yang dilakukan oleh virus (Schaap et al., 2012; Zhang & Zhang, 2020). Akan tetapi, telah banyak pula kajian teoretik mengenai kekakuan cangkang virus, seperti yang telah dilakukan oleh (Ahadi et al., 2013; Li et al., 2011). Mengkaji model numerik berbasis kontinum untuk mensimulasikan respon *nanoindentasi* dari DNA yang terdapat pada kapsid virus (Ahadi et al., 2013; Fischer et al., 2021). Sedangkan, elastisitas cangkang virus influenza dengan menggunakan dua metode, yakni: eksperimen dengan AFM dan pemodelan dengan *Finite Element Analysis* (FEA) (Li et al., 2011). Berdasarkan hal tersebut, maka pada artikel ini dibahas mengenai kekakuan dari cangkang virus HIV-1 (matang) dan HIV-1 (belum matang) secara teoretik melalui metode analitik dan simulasi. Secara analitik, salah satu teori yang dapat digunakan adalah teori *plate & shell* untuk menentukan kekakuan cangkang virus melalui jumlah antara energi bengkokan dan energi ulur. Selanjutnya, dibahas mengenai suatu metode analitik lainnya yang diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan wawasan mengenai kekakuan cangkang virus, yakni dengan mengkaji mengenai persamaan Michell dalam meninjau cangkang virus. Metode simulasi yang digunakan adalah metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan menggunakan *Abaqus Software Program for Free* (Akin, 2009).

2. METODE

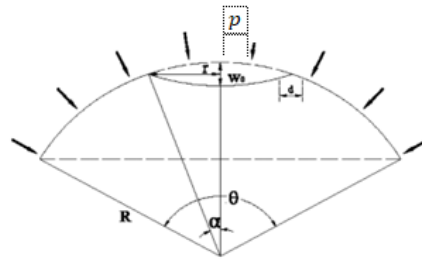
Penelitian ini merupakan penelitian dengan kaji literatur (*literature review*) dan penelitian eksplorasi (*exploratory research*) (Sakyi et al., 2020; Snyder, 2019). Kajian dalam artikel ini merupakan suatu telaah teoritis yang dilakukan melalui pengkajian beberapa pustaka atau literatur yang terkait yang menjadi subjek dari penelitian ini. Metode yang digunakan adalah metode analisis dan simulasi. Hasil kajian analitik dan simulasi yang dilakukan, selanjutnya dibandingkan dengan hasil eksperimen ataupun pemodelan yang telah dilakukan oleh peneliti lainnya. Pada artikel ini dikaji kekakuan dari suatu sel virus secara teoretik dengan metode analitik dan simulasi. Secara analitik, salah satu teori yang dapat digunakan adalah teori *plate & shell*. Selanjutnya, dibahas pula mengenai persamaan Michell dalam meninjau cangkang virus. Secara simulasi, metode simulasi yang digunakan adalah metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan menggunakan *Abaqus Software Program for Free*. Metode FEA adalah suatu metode komputasi yang digunakan untuk memprediksi karakteristik sesuatu, sebagai contoh cangkang virus yang dipengaruhi oleh efek fisik, seperti: *fatigue* (pembebanan). Pada metode ini, model cangkang virus diindentasikan dengan indenter yang sama dan radius dari indenter sebesar 10 nm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Teori *plate & shell* (*Plate & Shell Theory*) merupakan suatu teori yang mendeskripsikan secara matematis mengenai mekanika struktur dua dimensi pada pelat dan cangkang (Stephen Timoshenko et al., 1961). Nilai konstanta elastisitas diperoleh dengan cara menjumlahkan energi *buckling* (tekuk) dan energi *stretching* (regangan) pada cangkang, sehingga jumlah energi total pada cangkang adalah seperti pada persamaan (1).

$$U_{total} = U_b + U_s . \quad (1)$$



Gambar 1. Fenomena *Buckling* pada Kulit Permukaan Bola Tipis (Evkin et al., 2017; Khakina, 2013)

Berdasarkan Gambar 1, tampak bahwa indentasi (atau lekukan) w bervariasi relatif terhadap jarak d , maka nilai kekakuan dari suatu cangkang virus menurut teori *plate & shell* (Eshaghi et al., 2020) dapat dinyatakan sebagai dengan dengan E disebut modulus elastis cangkang dengan satuan gaya per satuan luas ($\frac{N}{m^2}$), h merupakan ketebalan cangkang, dan R merupakan radius *middle surface* cangkang, $R = R_1 + \frac{h}{2}$. Penyelesaian michell, pada section ini dibahas mengenai diperolehnya solusi persamaan Michell yang terkait dengan penentuan konstanta elastisitas suatu cangkang virus. Berdasarkan (Jiménez-Piqué et al., 2014; Keith R. Symon, 1971; Landau & Lifshitz, 1986), persamaan tekanan radial eksternal adalah seperti pada persamaan (2).

$$p = \frac{h}{R}(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\phi\phi}) \tag{2}$$

dengan $\sigma_{\theta\theta}$ dan $\sigma_{\phi\phi}$ merupakan tensor tegangan komponen lateral dan p merupakan tekanan radial eksternal. Pers. (3) merupakan suatu persamaan yang menyatakan keterkaitan antara tekanan radial eksternal dengan tensor tegangan komponen lateral pada cangkang virus. Berdasarkan (Schaap et al., 2012; Zandi & Reguera, 2005), persamaan tekanan termodinamika, yaitu seperti pada persamaan (3).

$$p = -\left(\frac{\partial H}{\partial V}\right)_{N,T} = k_B T \left(\frac{\partial}{\partial V} \ln Q\right)_{N,T}, \tag{3}$$

dengan tensor tegangan tiga dimensi pada cangkang virus dapat diperoleh dari fungsi partisi mekanika statistik suatu permukaan fluida yang dapat dituliskan seperti pada persamaan (4).

$$Q(N, V, T) = \frac{1}{\Lambda^{3N} N!} \int d\mathbf{r}_1 \int d\mathbf{r}_2 \int d\mathbf{r}_N e^{-\beta u(\mathbf{r}_i)}, \tag{4}$$

dimana Q merupakan fungsi partisi, Λ merupakan panjang gelombang De Broglie, N merupakan banyaknya kapsomer, \mathbf{r}_N merupakan posisi setiap kapsomer maupun lipid pada cangkang virus, $u(\mathbf{r}_i)$ merupakan energi potensial cangkang virus ke- i , dan \mathbf{r}_i adalah posisi kapsomer ke- i dan β merupakan konstanta dengan $\beta = \frac{1}{k_B T}$. Oleh karena itu, Pers. (3) dalam dalam sistem koordinat bola dapat dituliskan seperti pada persamaan (5).

$$p = -\frac{1}{4\pi R^2} \left(\frac{\partial H}{\partial R}\right)_{N,T} = k_B T \frac{1}{4\pi R^2} \frac{1}{Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial R}\right)_{N,T}. \tag{5}$$

Semua posisi kapsomer pada cangkang virus dinyatakan dalam radius bola R , yaitu seperti pada persamaan (6).

$$\mathbf{r}_i = R \mathbf{t}_i, \tag{6}$$

dengan \mathbf{t}_i merupakan koordinat posisi kapsomer ke- i yang ditunjukkan pada Gambar 1. Selanjutnya, Pers. (6) disubstitusikan ke Pers (4), sehingga diperoleh persamaan (7).

$$Q(N, V, T) = \frac{R^{3N}}{\Lambda^{3N} N!} \int d\mathbf{t}_1 \int d\mathbf{t}_2 \int d\mathbf{t}_N e^{-\beta u(R\mathbf{t}_i)}. \tag{7}$$

maka Pers.(5) dapat dituliskan menjadi persamaan (8)

$$p = kT \left(\frac{N}{V} - \frac{1}{3VkT} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial V(r_{ij})}{\partial r_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\alpha)(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\beta)}{r_{ij}} \right) \right), \tag{8}$$

Berdasarkan Zandi and Reguera (2005), didefinisikan tensor tegangan virial 3D sebagai berikut.

$$\sigma_{\alpha\beta}^{3D} = \frac{NkT}{V} - \frac{1}{V} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\alpha)(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\beta)}{r_{ij}} \right). \tag{9}$$

Tensor tegangan virial tiga dimensi dalam koordinat permukaan bola terdiri dari komponen lateral dan radial, yakni:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta}^{3D} &= \frac{NkT}{V} - \frac{1}{V} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\theta)^2}{r_{ij}} \right) \\ \sigma_{\phi\phi}^{3D} &= \frac{NkT}{V} - \frac{1}{V} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\phi)^2}{r_{ij}} \right) \\ \sigma_{rr}^{3D} &= \frac{NkT}{V} - \frac{1}{V} \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_r)^2}{r_{ij}} \right). \end{aligned} \tag{10}$$

Berdasarkan hubungan bahwa

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_{\theta\theta}^{3D} + \sigma_{\phi\phi}^{3D} + \sigma_{rr}^{3D}). \tag{11}$$

Oleh karena kekakuan cangkang berkaitan dengan tensor tegangan komponen lateral yang merupakan interaksi antar partikel kapsomer maupun lipid, sehingga peran tegangan komponen radial dapat diabaikan. Pers. (11) disebut sebagai persamaan Young-Laplace dapat dituliskan menjadi.

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_{\theta\theta}^{3D} + \sigma_{\phi\phi}^{3D}) = \frac{1}{3} (2\sigma_T^{3D}). \tag{12}$$

Berdasarkan Zandi and Reguera (2005), hubungan antara tensor tegangan 2D dan 3D untuk komponen tangensial ditinjau berdasar persamaan tensor tegangan virial, yaitu.

$$\Omega^d \sigma_{\alpha\beta}^d = - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\alpha)(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\beta)}{r_{ij}}, \tag{13}$$

dengan Ω^d menyatakan area permukaan (untuk $d = 2$) dan menyatakan volume (untuk $d = 3$), sehingga persamaan tensor tegangan 2D dan 3D, yaitu.

$$\sigma_{\theta\theta}^{2D} = - \frac{1}{4\pi R^2} \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\theta)^2}{r_{ij}} \tag{14}$$

dan

$$\sigma_{\theta\theta}^{3D} = - \frac{3}{4\pi R^3} \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\theta)^2}{r_{ij}}. \tag{15}$$

Merujuk pada Pers. (14) dan Pers. (15), maka didapatkan suatu keterkaitan antara tensor tegangan 2D dan 3D, yaitu.

$$\sigma_{\theta\theta}^{3D} = \frac{3}{R} \sigma_{\theta\theta}^{2D}, \tag{16}$$

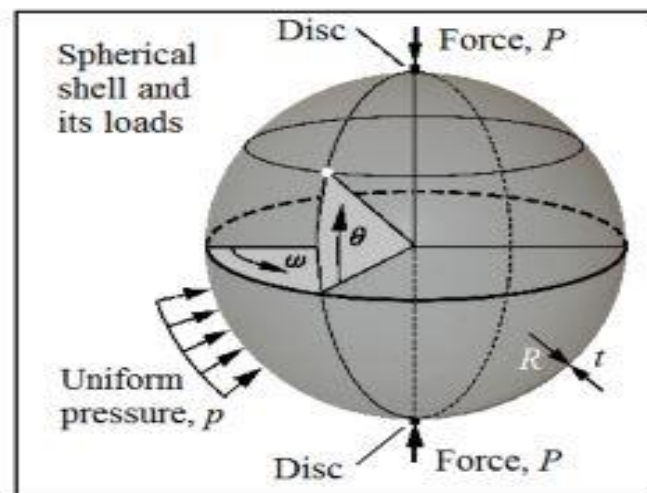
dengan $\sigma_{\theta\theta}^{2D} = \sigma_{\phi\phi}^{2D}$, yang merupakan tensor tegangan pada permukaan cangkang yang homogen, maka Pers. (13) dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned} \sigma_T^{2D} &= -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{\{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\theta)^2 + (\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\phi)^2\}}{2r_{ij}} \\ 2\sigma_T^{2D} &= -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{dV(r_{ij})}{dr_{ij}} \frac{\{(\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\theta)^2 + (\vec{r}_{ij} \cdot \hat{e}_\phi)^2\}}{r_{ij}} \\ 2\sigma_T^{2D} &= \sigma_{\theta\theta}^{2D} + \sigma_{\phi\phi}^{2D} = 2\sigma_{\theta\theta}^{2D} \\ \sigma_T^{2D} &= \sigma_{\theta\theta}^{2D}. \end{aligned} \tag{17}$$

Berdasarkan Pers. (17), diperoleh persamaan.

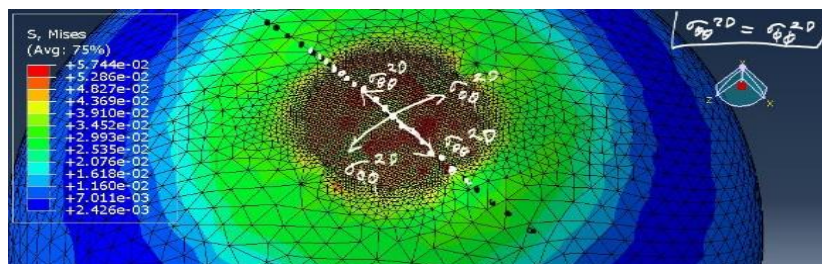
$$p = \frac{2}{R} \sigma_{\theta\theta}^{2D}. \tag{18}$$

Selanjutnya, menentukan kekakuan cangkang dengan menggunakan selesaikan persamaan Michell dengan meninjau lempengan cangkang virus dalam koordinat bola, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kulit Bola dengan Tekanan Eksternal p (Hutchinson & Thompson, 2018)

Berdasarkan Gambar 3, titik putih pada gambar menunjukkan lempengan cangkang virus dengan tensor tagangan diasumsikan homogen,



Gambar 3. Model FEA Cangkang Virus

Berdasarkan persamaan hukum Hooke, yaitu.

$$\frac{F}{\delta R} = -k, \tag{19}$$

maka konstanta elastisitas cangkang diperoleh sebagai berikut

$$k = \frac{2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{Eh^2}{R_2}. \tag{20}$$

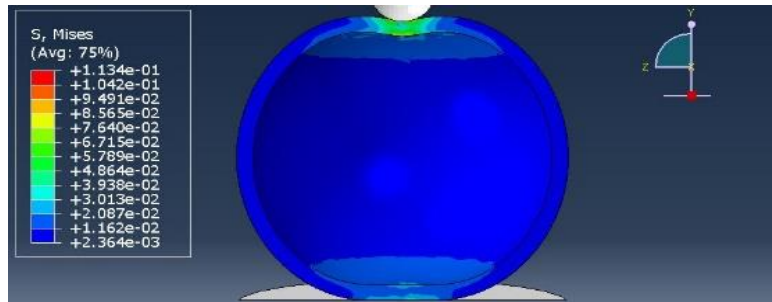
Jika, nilai dari $\frac{2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \approx 1$ dengan jangkauan $0 < \nu \leq 0.5$, sehingga nilai konstanta proporsionalitas c adalah

$$c \approx 1,$$

maka nilai konstanta elastisitas cangkang virus adalah.

$$k = \frac{Eh^2}{R_2}. \tag{21}$$

Human immunodeficiency virus type-1 matang (HIV-1 matang). Pada bagian ini dibahas mengenai nilai dari koefisien elastisitas suatu virus, yakni *human immunodeficiency virus type-1* matang yang diperoleh berdasarkan teori *plate & shell*, selesian Michell, dan metode *finite element analysis* (FEA). Karakteristik yang dimiliki cangkang virion HIV tipe 1 dalam kondisi matang, yaitu memiliki ketebalan $h = 5.0 \text{ nm}$, radius $R_1 = 45 \text{ nm}$, $R = 47.5 \text{ nm}$, dan $R_2 = 50.0 \text{ nm}$, rasio Poisson $\nu = 0.4$, dan modulus elastisitas $E = 0.44 \text{ GPa}$ (Ahadi et al., 2013; Eshaghi et al., 2020; Kol et al., 2007). Untuk model cangkang yang terindentasi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model HIV-1 Matang dengan Metode FEA.

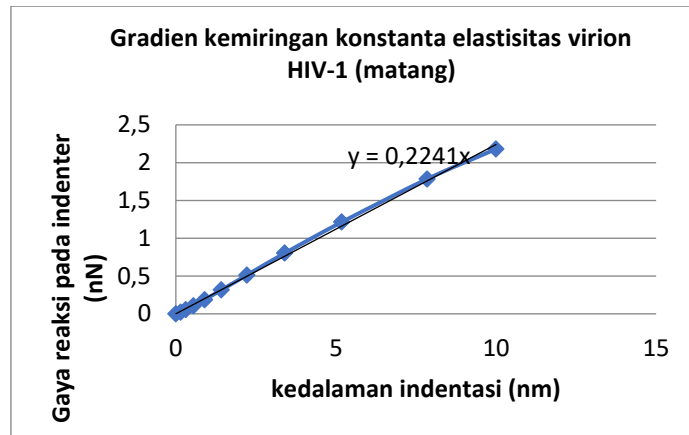
Berdasarkan karakteristik tersebut, didapatkan nilai konstanta elastisitas berdasarkan teori *plate & shell* adalah.

$$k_{matang_ps} = \frac{Eh^2}{R} = \frac{(0.44\text{GPa})(5.0 \text{ nm})^2}{(47.5\text{nm})} = 0.23 \frac{\text{nN}}{\text{nm}}, \tag{22}$$

dan berdasarkan selesian Michell diperoleh.

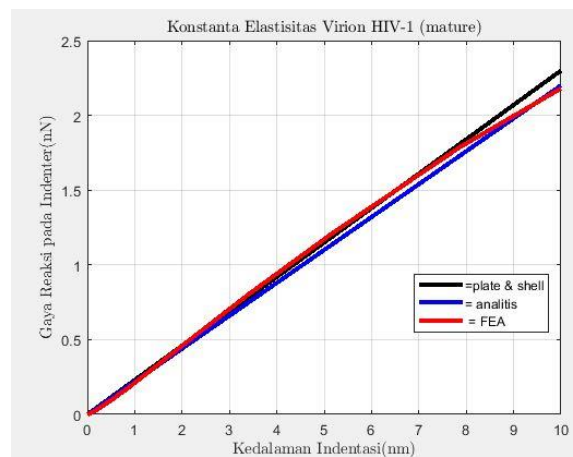
$$k_{matang_m} = \frac{Eh^2}{R_2} = \frac{(0.44\text{GPa})(5 \text{ nm})^2}{(50 \text{ nm})} = 0.22 \frac{\text{nN}}{\text{nm}}. \tag{23}$$

Sedangkan, berdasarkan metode FEA, konstanta elastisitas HIV-1 (matang) ditunjukkan pada Gambar 5.



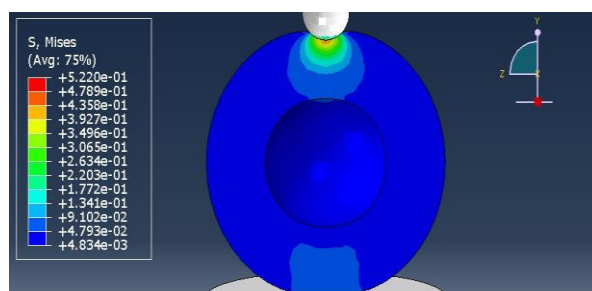
Gambar 5. Kemiringan Kurva Hasil FEA HIV-1 (Matang)

Berdasarkan kemiringan grafik, diperoleh bahwa nilai konstanta elastisitas cangkang adalah $0.22 \frac{nN}{nm}$. Untuk membandingkan konstanta elastisitas secara analitik dan simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Konstanta Elastisitas pada Cangkang HIV-1(Matang) Secara Analitik dan Simulasi

Secara umum, berdasarkan hasil yang diperoleh dan Gambar 6., tampak bahwa nilai konstanta elastisitas cangkang virus HIV-1 (matang) secara analitik dan simulasi mendekati nilai yang sama. Karakteristik yang dimiliki cangkang HIV-1 dalam keadaan belum matang, yaitu memiliki nilai modulus elastisitas sebesar $0.93 \text{ GPa} = 0.93 \frac{nN}{(nm)^2}$, radius eksternal sebesar 50 nm, ketebalan cangkang sebesar 25 nm dan rasio poisson sebesar $\nu = 0.4$ (Ahadi et al., 2013; Eshaghi et al., 2020; Kol et al., 2007). Untuk model cangkang virion HIV-1 yang belum matang ditunjukkan pada Gambar 7.



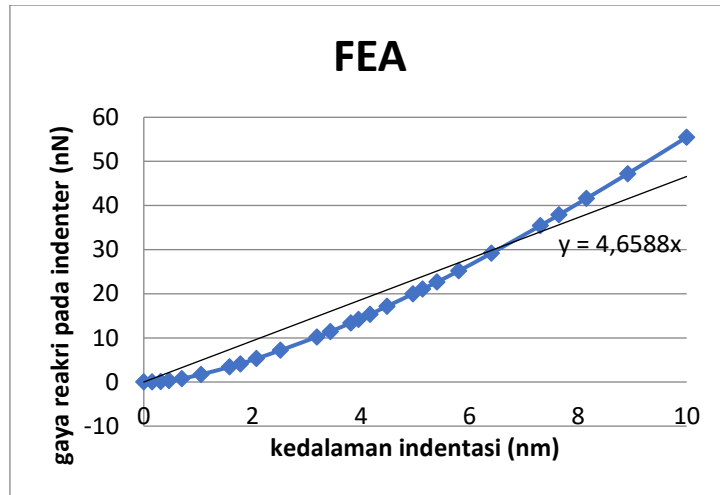
Gambar 7. Model Cangkang HIV-1 yang Belum Matang

Berdasarkan karakteristik yang dimiliki cangkang, didapatkan nilai konstanta elastisitas dengan menggunakan metode analitik dan numerik sebagai berikut. Berdasar teori *plate & shell* diperoleh,

$$k_{b_matang_ps} = \frac{Eh^2}{R} = \frac{(0.93)(25)^2 \text{ nN}}{37.5 \text{ nm}} = 15.5 \frac{\text{nN}}{\text{nm}}$$

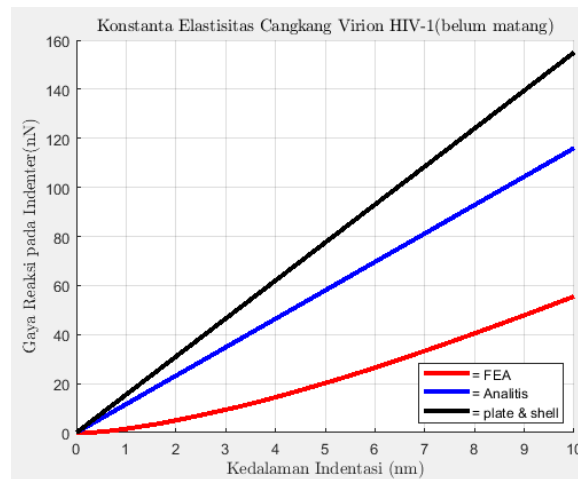
Sedangkan, berdasar persamaan Michel diperoleh, dan berdasarkan metode FEA diperoleh seperti pada Gambar 8.

$$k_{b_matang_m} = \frac{Eh^2}{R_2} = \frac{(0.93)(25)^2 \text{ nN}}{50 \text{ nm}} = 11.6 \frac{\text{nN}}{\text{nm}}$$



Gambar 8. Kemiringan Kurva Hasil FEA HIV-1 (Belum Matang)

Pada Gambar 8, diketahui bahwa nilai kemiringan kurva untuk model FEA HIV-1 yang belum matang bernilai $4.6588 \approx 4.7$. Sehingga nilai konstanta elastisitas cangkang virus HIV-1 yang belum matang adalah $4.658 \frac{\text{nN}}{\text{nm}}$. Untuk grafik perbandingan antara teori *plate & shell*, metode analitis, dan model FEA ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Konstanta Elastisitas pada Cangkang HIV-1(Belum Matang) Secara Analitik Dan Simulasi

Pembahasan

Berdasarkan kajian tersebut, maka konstanta elastisitas untuk virus HIV-1 (matang) dan HIV-1 (belum matang) secara analitik dan simulasi dapat ditunjukkan pada Table 1.

Tabel 1. Perbandingan Nilai Konstanta Elastisitas Virus HIV-1 Matang dan Belum Matang

Jenis Cangkang Virus	Penyelesaian Michell $\left(\frac{nN}{nm}\right)$	Teori <i>plate & shell</i> $\left(\frac{nN}{nm}\right)$	FEA $\left(\frac{nN}{nm}\right)$
HIV-1 (matang)	0.22	0.23	0.22
HIV-1 (belum matang)	11.6	15.5	4.7

Secara umum, tampak bahwa virus HIV-1 (matang) memiliki konstanta elastisitas yang lebih kecil bila dibandingkan dengan konstanta elastisitas virus HIV-1 (belum matang). Hal tersebut sangat terkait dengan karakteristik virus tersebut, yakni ukuran, ketebalan, dan sifat instrinsik virus. Berdasarkan (Ahadi et al., 2013; Fajriyah et al., 2017) dan (Kol et al., 2007), karakteristik yang dimiliki cangkang virion HIV tipe 1 dalam kondisi matang, yaitu memiliki ketebalan $h = 5.0 \text{ nm}$, radius $R_1 = 45 \text{ nm}$, $R = 47.5 \text{ nm}$, dan $R_2 = 50.0 \text{ nm}$, rasio Poisson $\nu = 0.4$, dan modulus elastisitas $E = 0.44 \text{ GPa}$. Sedangkan, karakteristik yang dimiliki cangkang HIV-1 dalam keadaan belum matang, yaitu memiliki nilai modulus elastisitas sebesar $0.93 \text{ GPa} = 0.93 \frac{nN}{(nm)^2}$, radius eksternal sebesar 50 nm , ketebalan cangkang sebesar 25 nm dan rasio poisson sebesar $\nu = 0.4$. Secara teoretik, modulus elastisitas suatu bahan sebanding dengan konstanta elastisitas bahan tersebut (Landau & Lifshitz, 1986; Mbhele et al., 2021; Stephen Timoshenko et al., 1961). Ini menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh pada Tabel 1. sesuai dengan yang telah dilakukan oleh (Ahadi et al., 2013; Kol et al., 2007). Virus dengan ketebalan cangkang yang lebih kecil memiliki konstanta elastisitas yang lebih kecil, sehingga lebih efisien untuk menginfeksi sel inang dibandingkan dengan virus yang memiliki konstanta elastisitas yang lebih besar. Selama daur hidup virus akan mengalami perubahan aspek mekanis terkait perubahan struktur protein cangkang virus dan juga virus HIV selama pematangan akan melunak akibat kurangnya beberapa protein, dan partikel lunak yang memasuki sel inang akan lebih efisien daripada yang lebih kaku (dengan konstanta elastisitas yang lebih besar) (Kol et al., 2007; Michel et al., 2006; Schaap et al., 2012).

4. SIMPULAN

Nilai kekakuan cangkang virus berbeda untuk berbagai virus tergantung pada sifat intrinsik (modulus elastisitas) dan sifat ekstrinsik (jari-jari dan ketebalan kulit virus). Dalam kajian ini, dianalisis nilai kekakuan cangkang virus secara teoretik dengan metode analitik dan simulasi. Diperoleh bahwa virus HIV-1 (matang) memiliki konstanta elastisitas yang lebih kecil bila dibandingkan dengan konstanta elastisitas virus HIV-1 (belum matang). Hal tersebut sangat terkait dengan karakteristik virus tersebut, yakni ukuran, ketebalan, dan sifat instrinsik virus. Virus dengan ketebalan cangkang yang lebih kecil memiliki konstanta elastisitas yang lebih kecil, sehingga lebih efisien untuk menginfeksi sel inang dibandingkan dengan virus yang memiliki konstanta elastisitas yang lebih besar.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ahadi, A., Johansson, D., & Evilevitch, A. (2013). Modeling and simulation of the mechanical response from nanoindentation test of DNA-filled viral capsids. *Journal of Biological Physics*, 39(2), 183–199. <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9297-9>.
- Akin, J. E. (2009). *Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks*.
- Atanackovic, T. M., & Guran, A. (2000). Theory of Elasticity for Scientists and Engineers. In *Theory of Elasticity for Scientists and Engineers*. Birkhäuser Boston. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1330-7>.
- Bruinsma, R. F., L. Wuite, G. J., & Roos, W. H. (2021). *Physics of viral dynamics*. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00267-1>.
- Eshaghi, B., Alsharif, N., An, X., Akiyama, H., Brown, K. A., Gummuluru, S., & Reinhard, B. M. (2020). Stiffness of HIV-1 Mimicking Polymer Nanoparticles Modulates Ganglioside-Mediated Cellular Uptake and Trafficking. *Advanced Science*, 7(18), 2000649. <https://doi.org/10.1002/adv.202000649>.
- Evkin, A., Kolesnikov, M., & Prikazchikov, D. A. (2017). Buckling of a spherical shell under external pressure and inward concentrated load: Asymptotic solution. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 22(6), 1425–1437. <https://doi.org/10.1177/1081286516635872>.
- Fajriyah, K., Mulawarman, W. G., & Rokhmansyah, A. (2017). Kepribadian Tokoh Utama Wanita Dalam Novel Alisya Karya Muhammad Makhdlori: Kajian Psikologi Sastra. *Journal of Culture, Arts, Literature, and Linguistics (CaLLs)*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.30872/calls.v3i1.773>.
- Fischer, W., Giorgi, E. E., Chakraborty, S., Nguyen, K., Bhattacharya, T., Theiler, J., & Korber, B. (2021). HIV-1

- and SARS-CoV-2: Patterns in the evolution of two pandemic pathogens. *Cell Host & Microbe*, 29(7), 1093–1110. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2021.05.012>.
- Gelderblom, H. R. (1996). *Structure and Classification of Viruses*.
- Hutchinson, J. W., & Thompson, J. M. T. (2018). Imperfections and energy barriers in shell buckling. *International Journal of Solids and Structures*, 148–149, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.01.030>.
- Jiménez-Piqué, E., Llanes, L., & Anglada, M. (2014). Resistance to Contact Deformation and Damage of Hard Ceramics. In *Comprehensive Hard Materials* (pp. 367–383). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096527-7.00032-5>.
- Keith R. Symon. (1971). *Mechanics (third edition)*.
- Khakina, P. N. (2013). Buckling Load of Thin Spherical Shells Based on the Theorem of Work and Energy. *International Journal of Engineering and Technology*, 392–394. <https://doi.org/10.7763/IJET.2013.V5.581>.
- Kol, N., Shi, Y., Tsvitov, M., Barlam, D., Shneck, R. Z., Kay, M. S., & Rousso, I. (2007). A Stiffness Switch in Human Immunodeficiency Virus. *Biophysical Journal*, 92(5), 1777–1783. <https://doi.org/10.1529/biophysj.106.093914>.
- Kondylis, P., Schlicksup, C. J., Zlotnick, A., & Jacobson, S. C. (2019). Analytical Techniques to Characterize the Structure, Properties, and Assembly of Virus Capsids. *Anal Chem*. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b04824>.
- Landau, D., & Lifshitz, E. M. (1986). *o o ft) (O I o Theory of Elasticity Second Revised and Enlarged Edition Course of Theoretical Physics Volume 7*.
- Li, S., Eghiaian, F., Sieben, C., Herrmann, A., & Schaap, I. A. T. (2011). Bending and puncturing the influenza lipid envelope. *Biophysical Journal*, 100(3), 637–645. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2010.12.3701>.
- Lošdorfer Božič, A., Šiber, A., & Podgornik, R. (2013). Statistical analysis of sizes and shapes of virus capsids and their resulting elastic properties. *Journal of Biological Physics*, 39(2), 215–228. <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9302-3>.
- Malkin, A. ., Kuznetsov, Y. ., & McPherson, A. (2001). Viral capsomere structure, surface processes and growth kinetics in the crystallization of macromolecular crystals visualized by in situ atomic force microscopy. *Journal of Crystal Growth*, 232(1–4), 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)01063-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)01063-6).
- Mateu, M. G. (2012). Mechanical properties of viruses analyzed by atomic force microscopy: A virological perspective. *Virus Research*, 168(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2012.06.008>.
- Mbhele, N., Chimukangara, B., & Gordon, M. (2021). HIV-1 integrase strand transfer inhibitors: a review of current drugs, recent advances and drug resistance. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 57(5), 106343. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2021.106343>.
- Michel, J. P., Ivanovska, I. L., Gibbons, M. M., Klug, W. S., Knobler, C. M., Wuite, G. J. L., & Schmidt, C. F. (2006). Nanoindentation studies of full and empty viral capsids and the effects of capsid protein mutations on elasticity and strength. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(16), 6184–6189. <https://doi.org/10.1073/pnas.0601744103>.
- Sakyi, K. A., Musona, D., & Mweshi, G. (2020). Research Methods and Methodology. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 7(3), 296–302. <https://doi.org/10.14738/assrj.73.7993>.
- Schaap, I. A. T., Eghiaian, F., des Georges, A., & Veigel, C. (2012). Effect of envelope proteins on the mechanical properties of influenza virus. *The Journal of Biological Chemistry*, 287(49), 41078–41088. <https://doi.org/10.1074/jbc.M112.412726>.
- Scoca, V., & Di Nunzio, F. (2021). Membraneless organelles restructured and built by pandemic viruses: HIV-1 and SARS-CoV-2. *Journal of Molecular Cell Biology*, 13(4), 259–268. <https://doi.org/10.1093/jmcb/mjab020>.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2019.07.039>.
- Stephen Timoshenko, J. G. Gere, & James M. Gere. (1961). *Theory of elastic stability (Stephen P. Timoshenko, James M. Gere) (z-lib.org)*.
- Sufiawati, I., Herrera, R., Mayer, W., Cai, X., Borkakoti, J., Lin, V., & Tugizov, S. M. (2021). Human Immunodeficiency Virus (HIV) and Human Cytomegalovirus (HCMV) Coinfection of Infant Tonsil Epithelium May Synergistically Promote both HIV-1 and HCMV Spread and Infection. *Journal of Virology*, 95(18), e00921–21. <https://doi.org/10.1128/JVI.00921-21>.
- Zandi, R., & Reguera, D. (2005). Mechanical properties of viral capsids. *Physical Review E*, 72(2), 021917. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.021917>.
- Zhang, C.-Y., & Zhang, N.-H. (2020). Size Effect on Structure and Stiffness of Viral DNA during Temperature Variation. <https://doi.org/10.1101/2020.08.29.273755>.