



# Efektivitas Simulasi Virtual PhET dalam Pembelajaran Fisika Zat Padat untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep Calon Guru Fisika

Heni Rusnayati<sup>1\*</sup>, Raden Giovanni Ariantara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

\*Corresponding author : [heni@upi.edu](mailto:heni@upi.edu)

## Article History:

Received: April 21, 2024

Revised: Mei 10, 2024

Accepted: Mei 20, 2024

Published: Juni 01, 2024

## Keywords:

Concept understanding, effectiveness, solid-state physics, virtual simulation

**Abstract:** *One of the challenges in learning solid-state physics is that phenomena are microscopic and therefore difficult for students to understand. This study aims to evaluate the effectiveness of using PhET virtual simulations in solid-state physics learning in improving conceptual understanding among prospective physics teachers. The research method used was a quasi-experiment with a one-group pretest-posttest design. The sample consisted of 30 prospective physics teachers from the Universitas Pendidikan Indonesia in Bandung. Concept understanding is measured through a description test. Data were analyzed using the Wilcoxon test and normalized gain to assess the effectiveness of virtual simulation and increase understanding of concepts. The results of the analysis show the positive potential of PhET virtual simulations in increasing the understanding of solid-state physics concepts for prospective physics teachers. Further research is needed regarding factors that can optimize the use of PhET virtual simulations in learning.*

**Abstrak:** Salah satu tantangan dalam pembelajaran fisika zat padat adalah fenomena-fenomena yang mikroskopis sehingga sulit dipahami oleh mahasiswa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan simulasi virtual PhET dalam pembelajaran fisika zat padat dalam meningkatkan pemahaman konsep di antara calon guru fisika. Metode penelitian yang digunakan adalah *quasi-experiment* dengan desain *one-group pretest-posttest*. Sampel terdiri dari 30 calon guru fisika dari Universitas Pendidikan Indonesia di Bandung. Pemahaman konsep diukur melalui tes uraian. Data dianalisis menggunakan uji Wilcoxon dan gain ternormalisasi untuk menilai efektivitas simulasi virtual serta peningkatan pemahaman konsep. Hasil analisis menunjukkan potensi positif simulasi virtual PhET dalam meningkatkan pemahaman konsep fisika zat padat untuk calon guru fisika. Perlu penelitian lanjutan terkait faktor-faktor yang dapat mengoptimalkan penggunaan simulasi virtual PhET dalam pembelajaran.

## PENDAHULUAN

Pembelajaran fisika di pendidikan tinggi, terutama bagi calon guru fisika, menghadapi tantangan dalam menyampaikan konsep-konsep kompleks seperti fisika zat padat (Van Dusen et al., 2021). Fisika zat padat mencakup berbagai konsep yang kompleks dan abstrak, seperti struktur kristal, bandgap elektronik, fonon, dan sifat termal material (Erceg et al., 2021). Terdapat

temuan yang menyoroti rendahnya pemahaman konsep fisika zat padat pada calon guru fisika di Indonesia. Latifah (2018) menunjukkan bahwa banyak mahasiswa mengalami kesulitan dalam memahami struktur kristal, energi band, dan sifat-sifat material. Hasil penelitian Rahmawati et al. (2019) mengungkapkan miskonsepsi umum juga dialami mahasiswa tentang ikatan kimia dalam zat padat dan interpretasi yang keliru

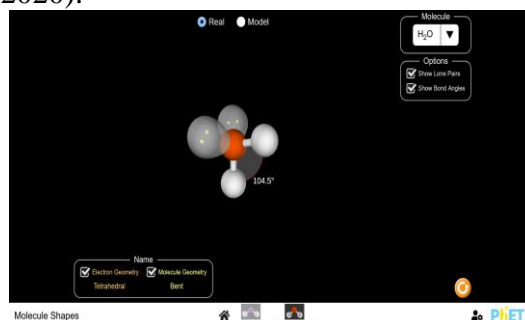
mengenai difraksi sinar-X. Mahasiswa sering mengalami kesulitan dalam memahami konsep-konsep abstrak ini karena kurangnya visualisasi yang memadai dan koneksi antara teori dan aplikasi praktis (Kalman et al., 2020). Kedua hal diatas belum teratasi oleh metode pembelajaran konvensional.

Metode pembelajaran konvensional yang didominasi oleh ceramah dan penggunaan buku teks seringkali tidak cukup efektif dalam menyampaikan konsep-konsep kompleks dalam fisika zat padat (Kumar et al., 2021). Mahasiswa membutuhkan lebih dari sekadar penjelasan verbal dan gambar statis untuk memahami dinamika dan sifat intrinsik material. Li & Singh (2020) menjelaskan bahwa metode konvensional kurang mampu melibatkan mahasiswa dalam pembelajaran aktif dan interaktif yang dibutuhkan untuk memahami materi yang kompleks. Akibatnya, fisika zat padat sering dianggap sulit dan kurang menarik oleh mahasiswa, yang dapat mengurangi motivasi dan keterlibatan mereka dalam pembelajaran. Metode pembelajaran yang lebih interaktif dan berbasis teknologi dapat meningkatkan keterlibatan dan motivasi mahasiswa (Savelsbergh et al., 2019). Peningkatan keterlibatan ini sangat penting bagi calon guru fisika untuk memastikan mereka dapat mempelajari dan mengajarkan materi secara efektif.

Selain itu, terdapat kendala utama dalam pembelajaran fisika zat padat, yaitu keterbatasan dalam visualisasi fenomena yang tidak dapat diamati secara langsung. Eksperimen laboratorium yang relevan sering kali memerlukan peralatan mahal dan tidak selalu tersedia. Kurangnya akses ke laboratorium dan peralatan yang memadai menghambat kemampuan mahasiswa untuk memahami dan mengaplikasikan konsep fisika zat padat dalam konteks praktis (Wang et al., 2021). Padahal mahasiswa sebagai calon guru fisika perlu menguasai integrasi antara teori dan praktik untuk dapat

mengajarkan fisika zat padat secara efektif. Kesenjangan antara teori yang dipelajari di kelas dan aplikasi praktis di laboratorium dapat menghambat pemahaman yang komprehensif (Wilson et al., 2021).

Salah satu inovasi yang telah banyak digunakan dalam pendidikan fisika adalah simulasi virtual PhET (*Physics Education Technology*) yang dikembangkan oleh *University of Colorado Boulder*. Simulasi PhET menyediakan visualisasi dinamis seperti yang terlihat pada Gambar 1. Hal ini memungkinkan mahasiswa untuk melihat representasi visual dari konsep-konsep yang kompleks dan abstrak dalam fisika zat padat. Misalnya, simulasi mengenai struktur kristal memungkinkan mahasiswa untuk melihat langsung bagaimana atom-atom tersusun dalam suatu material. Visualisasi interaktif ini membantu mahasiswa memahami struktur dan sifat-sifat material dengan lebih baik dibandingkan dengan metode pembelajaran tradisional yang hanya menggunakan buku teks (Wieman et al., 2020).



Gambar 1. Simulasi Virtual PhET

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan simulasi interaktif dapat meningkatkan pemahaman konsep fisika. Sebagai contoh, PhET memungkinkan mahasiswa untuk melakukan eksperimen virtual yang interaktif, di mana mereka dapat mengubah parameter-parameter tertentu dan melihat efeknya secara langsung. Eksperimen virtual ini mempromosikan pembelajaran aktif dan membantu mahasiswa mengembangkan

pemahaman yang lebih mendalam melalui eksplorasi dan manipulasi langsung (Moore et al., 2019).

Penggunaan simulasi PhET dalam pembelajaran dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan mahasiswa. Visualisasi yang menarik dan interaktivitas tinggi membuat proses belajar menjadi lebih menyenangkan dan menarik, yang pada gilirannya dapat meningkatkan minat mahasiswa dalam mempelajari fisika zat padat. Mahasiswa yang belajar dengan simulasi interaktif menunjukkan keterlibatan lebih tinggi dan pemahaman konsep lebih baik dibandingkan dengan mereka yang belajar melalui metode konvensional (Adams et al., 2018).

Simulasi PhET dapat digunakan untuk pembelajaran mandiri maupun kolaboratif. Mahasiswa dapat mengakses simulasi ini secara *online* dan mempelajari materi sesuai dengan kecepatan mereka sendiri, yang dapat membantu mereka memahami konsep-konsep yang sulit. Selain itu, simulasi ini juga dapat digunakan dalam *setting* kelompok, di mana mahasiswa dapat berdiskusi dan bekerja sama untuk menyelesaikan masalah yang diberikan. Heron et al. (2021) menemukan bahwa pembelajaran kolaboratif menggunakan simulasi PhET meningkatkan pemahaman konsep dan kemampuan pemecahan masalah mahasiswa.

Simulasi PhET membantu mahasiswa menghubungkan teori dengan aplikasi praktis. Dalam fisika zat padat, banyak konsep yang bersifat abstrak dan sulit dipahami tanpa visualisasi atau aplikasi nyata. PhET membantu menjembatani kesenjangan ini dengan memberikan konteks praktis yang relevan untuk konsep-konsep teoretis yang dipelajari. Penelitian oleh Olson et al. (2019) menunjukkan bahwa mahasiswa yang menggunakan simulasi PhET memiliki pemahaman yang lebih baik

tentang bagaimana teori fisika diterapkan dalam konteks nyata.

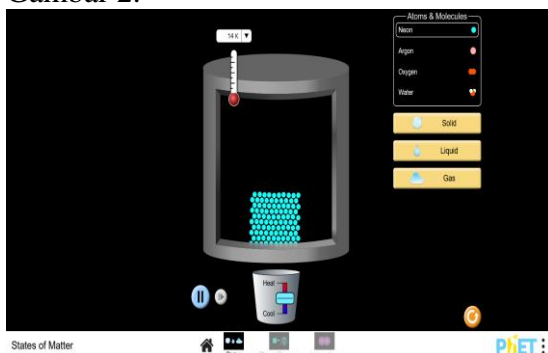
Namun, meskipun manfaat simulasi PhET telah banyak dibahas, masih terdapat gap penelitian terkait efektivitasnya dalam konteks pendidikan calon guru fisika, terutama dalam topik fisika zat padat. Calon guru memerlukan pemahaman yang mendalam agar mereka dapat menjelaskan konsep-konsep ini dengan baik di dalam kelas nantinya. Finkelstein et al. (2019) menggarisbawahi pentingnya integrasi teknologi dalam pelatihan guru untuk memastikan mereka siap menggunakan alat-alat modern dalam pengajaran.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas simulasi virtual PhET dalam meningkatkan pemahaman konsep fisika zat padat pada mahasiswa calon guru fisika. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan metode pembelajaran fisika yang lebih efektif di perguruan tinggi. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan kurikulum dan pelatihan guru yang lebih baik, sehingga calon guru fisika dapat lebih siap dalam mengajar materi-materi kompleks di masa depan. Dengan demikian, peningkatan kualitas pendidikan fisika di tingkat perguruan tinggi akan berdampak positif pada kualitas pendidikan fisika di sekolah-sekolah menengah, di mana para mahasiswa ini akan berperan sebagai guru.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah *quasi-experiment* dengan *desain one group pretest-posttest* (Creswell & Creswell, 2018). Pemberian *pretest* dilakukan kepada 30 calon guru fisika dari sebuah universitas di Bandung untuk mengetahui pemahaman konsep awal mahasiswa sebelum simulasi virtual PhET diterapkan dalam pembelajaran. Kemudian diberikan perlakuan yaitu

pembelajaran menggunakan simulasi virtual PhET selama 14 pertemuan pada kelas tersebut, salah satunya terlihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Contoh Simulasi Virtual PhET yang Digunakan pada Pembelajaran Fisika Zat Padat

*Posttest* diberikan untuk mengetahui penguasaan konsep siswa setelah pemberian perlakuan. Instrumen *pretest* dan *posttest* yang digunakan untuk

mengukur pemahaman konsep adalah lima belas butir tes uraian fisika zat padat. Konsep yang diujikan pada tes meliputi sel Wigner-Seitz; sel konvensional dan primitif; sistem indeks; difraksi sinar X; ikatan Van der Waals; ikatan ionik; serta gelombang elastis monoatomik dan diatomik. Contoh instrumen *pretest* dan *posttest* pemahaman konsep fisika zat padat ditampilkan pada Tabel 1. Hasil *pretest* dan *posttest* dianalisis menggunakan uji Shapiro-Wilk untuk mengetahui normalitas distribusi data (Cohen, et al., 2017). Kemudian uji Wilcoxon (Cohen, et al., 2017) dan gain ternormalisasi (Hake, 1998) dilakukan untuk menilai efektivitas simulasi virtual PhET serta peningkatan pemahaman konsep.

**Tabel 1.** Contoh Instrumen Tes Pemahaman Konsep Fisika Zat Padat

Indikator	Soal	Jawaban
Membedakan konsep sinar-X Bremsstrahlung dan sinar-X karakteristik	Jelaskan perbedaan sinar-X Bremsstrahlung dan sinar-X karakteristik berdasarkan apa yang anda pahami!	Sinar-X Bremsstrahlung dihasilkan ketika elektron berenergi tinggi berinteraksi dengan materi dan mengalami perlambatan, spektrum energi yang dihasilkan kontinu. Sinar-X karakteristik terbentuk melalui proses perpindahan elektron dari tingkat energi tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah dalam atom, spektrum energi yang dihasilkan diskrit.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

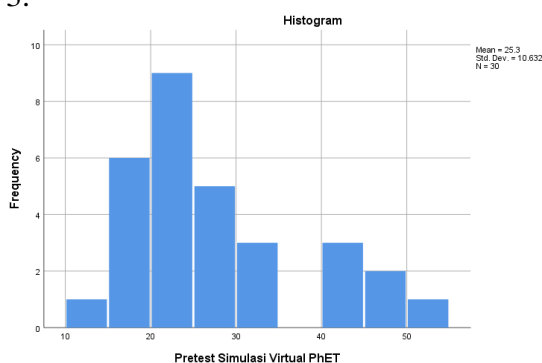
Hasil data *pretest* dan *posttest* yang diperoleh menggambarkan pemahaman calon guru fisika terhadap konsep fisika zat padat. Uji Shapiro-Wilk digunakan untuk mengetahui apakah data berdistribusi normal atau tidak dengan menggunakan ukuran sampel (N) 30 dan nilai signifikansi ( $\alpha$ ) 0,05. Hasil normalitas untuk data *pretest* dan *posttest* pemahaman konsep fisika zat padat disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Normalitas *Pretest* dan *Posttest* menggunakan Uji Shapiro-Wilk

	<i>Pretest</i>	<i>Posttest</i>
Mean	25,30	63,43
SD	10,63	16,12
Statistic	0,882	0,925
df	30	30
Sig.	0,003	0,036
Result	Not Normal	Not Normal

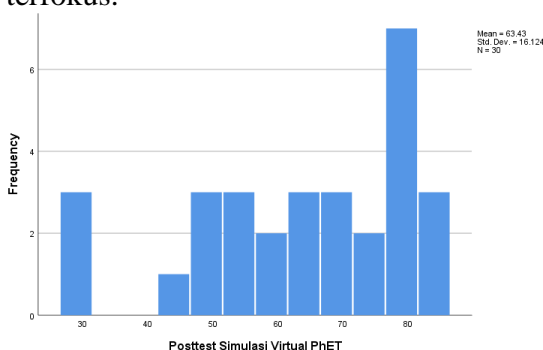
Dari hasil tersebut diketahui bahwa nilai Sig. untuk data *pretest* dan *posttest* lebih kecil dari 0,05, maka tidak terdistribusi normal. Hal ini wajar karena pada saat *pretest*, sebagian besar mahasiswa masih kesulitan dalam memahami konsep pada pembelajaran fisika zat padat sehingga mayoritas mahasiswa memiliki skor *pretest* yang rendah. Temuan Lee et al., (2021) memperkuat bahwa skor *pretest* yang rendah adalah indikator umum dari tantangan awal yang dihadapi mahasiswa dalam menguasai materi fisika zat padat, menekankan perlunya pendekatan pembelajaran yang lebih inovatif. Secara deskriptif, sebaran data *pretest* pemahaman konsep fisika zat padat cenderung tidak terdistribusi normal,

namun berkumpul di kiri seperti ditunjukkan oleh histogram pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Histogram Skor *Pretest* Pemahaman Konsep Fisika Zat Padat Sebelum Penerapan Simulasi Virtual PhET

Apabila melihat sebaran histogram data *posttest* pada Gambar 4, secara deskriptif skor pemahaman konsep fisika zat padat juga cenderung tidak terdistribusi normal. Berbeda dengan *pretest*, data *posttest* justru berkumpul di kanan. Artinya sebagian besar mahasiswa dapat memahami konsep pada pembelajaran fisika zat padat dengan lebih baik. Studi oleh Brown et al. (2020) juga mendukung temuan ini, menunjukkan bahwa mahasiswa yang memahami konsep fisika zat padat dengan lebih baik tercermin dalam distribusi skor *posttest* yang lebih tinggi dan lebih terfokus.



**Gambar 4.** Histogram Skor *Posttest* Pemahaman Konsep Fisika Zat Padat Sesudah Penerapan Simulasi Virtual PhET

Selanjutnya, diperlukan statistik nonparametrik untuk menguji hipotesis pada data yang tidak terdistribusi normal. Oleh karena itu, uji Wilcoxon dilakukan

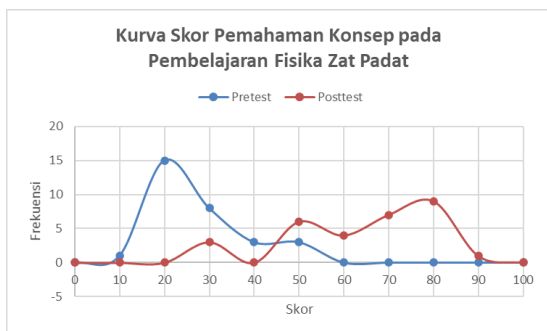
untuk mengetahui apakah penggunaan simulasi virtual PhET efektif dalam meningkatkan pemahaman konsep calon guru fisika pada pembelajaran fisika zat padat di perguruan tinggi. Hasil uji Wilcoxon untuk data *pretest* dan *posttest* ditampilkan pada Tabel 3 dengan menggunakan derajat kebebasan (N) 30 dan nilai signifikansi ( $\alpha$ ) 0,05.

**Tabel 3.** Efektivitas Penggunaan Simulasi Virtual PhET menggunakan Uji Wilcoxon

<i>Related-Samples Wilcoxon Signed Rank Test</i>	
<i>Null Hypothesis</i>	<i>The median of differences between Pretest Simulasi Virtual PhET and Posttest Simulasi Virtual PhET equals 0</i>
<i>N</i>	30
<i>Asymptotic Sig. (2-sided test)</i>	0,000002
<i>Result</i>	<i>Reject the null hypothesis.</i>

Berdasarkan hasil perhitungan statistik dengan menggunakan uji Wilcoxon menunjukkan bahwa nilai *Asymptotic Sig. (2-sided test)* lebih kecil dari 0,05. Maka hipotesis awal ditolak sehingga hipotesis alternatif diterima yaitu terdapat perbedaan skor rata-rata *pretest* dan *posttest* pemahaman konsep fisika zat padat setelah menggunakan simulasi virtual PhET. Dengan demikian, penggunaan simulasi virtual PhET terbukti secara statistik efektif dalam meningkatkan pemahaman konsep calon guru fisika.

Perolehan gambaran analisis yang lebih lanjut, perbedaan skor *pretest* dan *posttest* disajikan dalam bentuk kurva pada Gambar 5. Terlihat bahwa kurva skor rata-rata pemahaman konsep calon guru fisika bergeser ke kanan. Hal tersebut menunjukkan adanya perbedaan positif dari *pretest* dan *posttest*. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa kurva tersebut menunjukkan peningkatan pemahaman konsep calon guru fisika yang signifikan pada pembelajaran fisika zat padat setelah penggunaan simulasi virtual PhET.



**Gambar 5.** Kurva Skor Pemahaman Konsep Mahasiswa pada Pembelajaran Fisika Zat Padat

Analisis peningkatan pemahaman konsep lebih detail ditampilkan dalam hasil perhitungan *gain* ternormalisasi (*n-gain*) pada Tabel 4. Terdapat peningkatan skor rata-rata *pretest* dan *posttest* pemahaman konsep calon guru fisika dengan nilai *n-gain*  $\langle g \rangle$  0,51. Artinya penggunaan simulasi virtual PhET dapat meningkatkan pemahaman konsep calon guru fisika pada pembelajaran fisika zat padat dengan kategori sedang. Studi oleh Hamamous & Benjelloun (2023) juga mendukung temuan tersebut, menunjukkan bahwa penggunaan simulasi PhET dalam pembelajaran fisika

zat padat dapat merangsang minat belajar dan memperdalam pemahaman mahasiswa terhadap materi tersebut.

**Tabel 4.** Peningkatan Skor dari *Pretest* dan *Posttest* menggunakan *Gain Ternormalisasi*

<i>Gain Ternormalisasi (n-gain)</i>	
% $\langle S_i \rangle$ <i>Pretest</i>	25
% $\langle S_f \rangle$ <i>Posttest</i>	63
<i>n-gain</i> $\langle g \rangle$	0,51
Kategori	Sedang

Peningkatan pemahaman konsep hasil perhitungan *gain* ternormalisasi diperkuat dengan perubahan pada jawaban mahasiswa dari *pretest* ke *posttest* yang ditunjukkan contohnya pada Tabel 5. Saat *pretest*, mahasiswa cenderung belum dapat menggambarkan dengan baik terkait sel konvensional dan sel primitif dari segi panjang berpusat, *hexagonal*, kubus FCC dan kubus BCC. Hal ini mengakibatkan kesalahan pada penentuan jumlah sel baik pada sel konvensional maupun sel primitif untuk keempat struktur kristal dalam soal.

**Tabel 5.** Contoh peningkatan pemahaman konsep pada jawaban *pretest* dan *posttest*

Soal	Contoh Jawaban <i>Pretest</i>	Contoh Jawaban <i>Posttest</i>
Tentukan jumlah sel konvensional dan sel primitif dari segi panjang berpusat, hexagonal, kubus FCC dan kubus BCC! Lengkapi penjelasan anda dengan gambar!	<p>→ Segi panjang Berpusat                      sel konvensional = <math>4 \times 6</math>                      = 24                      sel primitif = <math>8 \times 6</math>                      = 48</p> <p>→ Hexagonal                      sel konvensional = <math>4 \times 5</math>                      = 20                      sel primitif = <math>8 \times 5</math>                      = 40</p> <p>→ Kubus FCC                      sel konvensional = <math>1 \times 4</math>                      = 4                      sel primitif = <math>2 \times 4</math>                      = 8</p> <p>→ Kubus BCC                      sel konvensional = <math>8 \times 4</math>                      = 32                      sel primitif = <math>8 \times 8</math>                      = 64</p>	<p>Segi Panjang Berpusat                       sel konvensional = 2                      sel primitif = 1</p> <p>kubus FCC                       sel konvensional = 4                      sel primitif = 1 ✓</p> <p>kubus BCC                       sel konvensional = 2                      sel primitif = 1 ✓</p> <p>Hexagonal                       sel primitif = 2                      sel konvensional = 6 ✓</p>

Berbeda halnya dengan *posttest*, terlihat bahwa mahasiswa sudah mampu memvisualisasikan sel konvensional dan sel primitif dengan baik dalam bentuk gambar. Hal ini berdampak pada peningkatan pemahaman konsep mahasiswa sehingga mampu menentukan jumlah sel konvensional dan sel primitif dari suatu struktur kristal. Sebanda dengan temuan Saudelli, et al. (2021) bahwa terdapat peran simulasi virtual PhET dalam membantu mahasiswa untuk meningkatkan kemampuan visualisasi konsep abstrak pada fisika zat padat, salah satunya yaitu sel dalam struktur kristal.

Memaksimalkan efektivitas simulasi virtual PhET, diperlukan integrasi dengan metode pembelajaran lainnya seperti diskusi kelompok, demonstrasi langsung, dan eksperimen laboratorium. Penggabungan berbagai metode ini dapat memberikan pemahaman konsep yang lebih komprehensif dan mendalam. Pengembangan materi pendukung seperti panduan penggunaan simulasi, lembar kerja, dan video tutorial yang dapat membantu mahasiswa dalam menggunakan simulasi juga menjadi faktor pendukung keberhasilan penggunaan simulasi virtual PhET pada pembelajaran fisika zat padat.

### SIMPULAN DAN SARAN

Setelah diketahui nilai *pretest* dan *posttest* tidak berdistribusi normal maka dilakukan uji Wilcoxon untuk mengetahui efektivitas penggunaan simulasi virtual PhET efektif dalam meningkatkan pemahaman konsep calon guru fisika pada pembelajaran fisika zat padat. Diperoleh nilai *Asymptotic Sig. (2-sided test)* yang menunjukkan bahwa simulasi virtual PhET statistik efektif untuk meningkatkan pemahaman konsep calon guru fisika. Dengan menganalisis nilai gain ternormalisasi (*n-gain*) dari skor *pretest* dan *posttest* diperoleh kesimpulan bahwa setelah simulasi virtual PhET digunakan pada pembelajaran fisika zat

padat, terjadi peningkatan pemahaman konsep calon guru fisika dengan kategori sedang. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengeksplorasi faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi efektivitas penggunaan simulasi virtual PhET, seperti perbedaan gaya belajar mahasiswa, tingkat kesulitan materi, dan durasi penggunaan simulasi virtual PhET. Penelitian lanjutan dapat memberikan wawasan tambahan untuk lebih mengoptimalkan penggunaan simulasi virtual PhET dalam pembelajaran.

### DAFTAR PUSTAKA

- Adams, W. K., Paulson, A., & Wieman, C. E. (2018). What levels of guidance promote engaged exploration with interactive simulations? *Journal of Educational Psychology*, 110(2), 230-242. doi:10.1037/edu0000212.
- Brown, D., Williams, B., & Thompson, R. (2020). Impact of Problem-Based Learning on Student Performance in Solid State Physics. *Physical Review Physics Education Research*, 36(1), 200-215.
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2017). *Research Methods in Education*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315456539>.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches, Fifth Edition*. Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc.
- Erceg, N., Jelovica, L., Hrepić, Z., Mešić, V., Karuza, M., & Aviani, I. (2021). University students' conceptual understanding of microscopic models of electrical and thermal conduction in solids. *European Journal of Physics*, 42(4), 045702.

- Finkelstein, N. D., Adams, W. K. & Keller, C. J. (2019). High-tech tools for teaching physics: the physics education technology project. *Journal of Science Education and Technology*, 25(2), 127-136. doi:10.1007/s10956-018-9470-y.
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A sixthousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64-74.
- Hamamous, A., & Benjelloun, N. (2023). Influences of the effective use of a computer simulation on learning in physical science. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, 12(3), 1591-1598.
- Heron, P. R. L., & McDermott, L. C. (2021). The impact of collaborative learning with interactive simulations on students' understanding of physics concepts. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020110. doi:10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020110.
- Kalman, C. S., Rohar, S., & Singamsetti, R. (2020). Addressing the complexity of learning quantum mechanics and solid state physics through conceptual understanding. *Journal of Science Education and Technology*, 29(4), 529-543. doi:10.1007/s10956-020-09833-2.
- Kumar, V., Gulati, S., Deka, B., & Sarma, H. (2021). Teaching and Learning Crystal structures through Virtual Reality based systems. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101362.
- Latifah, N. (2018). Evaluasi pemahaman konsep fisika zat padat pada mahasiswa calon guru fisika. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 14(2), 112-119. doi:10.15294/jpfi.v14i2.12345.
- Lee, C., Kim, S., & Park, J. (2021). Impact of Active Learning Strategies on Student Performance in Solid State Physics. *Journal of Science Education and Technology*, 30(1), 150-170.
- Li, Y., & Singh, C. (2020). Improving students' understanding of advanced concepts in solid state physics using interactive learning tools. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1), 010123. doi:10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010123.
- Moore, E. B., & Perkins, K. K. (2019). Enhancing student engagement through interactive simulations: The role of interactivity in learning. *Journal of Science Education and Technology*, 28(3), 190-204. doi:10.1007/s10956-019-09772-4.
- Olson, J. K., & Becker, N. M. (2019). Using simulations to bridge the gap between theory and practice in physics education. *Journal of Chemical Education*, 96(10), 2127-2133. doi:10.1021/acs.jchemed.9b00238.
- Rahmawati, D., Sari, I. P., & Kurniawan, W. (2019). Identifikasi miskonsepsi fisika zat padat pada calon guru fisika. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 5(1), 21-29. doi:10.29303/jpft.v5i1.1307.
- Saudelli, M. G., Kleiv, R., Davies, J., Jungmark, M., & Mueller, R. (2021). PhET simulations in undergraduate physics: Constructivist learning theory in practice. *Brock Education Journal*, 31(1).
- Savelsbergh, E. R., Prins, G. T., & Rietbergen, C. (2019). Effects of



- innovative science and mathematics teaching on student attitudes and achievement: A meta-analytic study. *Educational Research Review*, 27, 16-31. doi:10.1016/j.edurev.2018.10.003.
- Van Dusen, B., Vogelsang, C., Taylor, J., Cauet, E. (2021). How to Teach a Teacher: Challenges and Opportunities in Physics Teacher Education in Germany and the USA. In: Fischer, H.E., Girwitz, R. (eds) *Physics Education. Challenges in Physics Education*. Springer, 55-81. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87391-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87391-2_3)
- Wang, J., Zhang, Q., & Gao, X. (2021). Addressing challenges in teaching solid-state physics: The role of visualization and practical work. *European Journal of Physics*, 42(2), 025701. doi:10.1088/1361-6404/abcdee.
- Wieman, C. E., & Perkins, K. K. (2020). Transforming physics education using interactive simulations. *Physics Today*, 73(1), 40-45. doi:10.1063/PT.3.4398.
- Wilson, J. H., Adams, W. K., & Perkins, K. K. (2021). Bridging the gap between theoretical and practical understanding in solid state physics: The role of virtual laboratories. *European Journal of Physics*, 42(3), 035704. doi:10.1088/1361-6404/abf5b2.