

IMPLEMENTASI DAN TANTANGAN INTEGRASI SIMULASI KOMPUTER DALAM PERKULIAHAN FISIKA STATISTIK DI INSTITUT PENDIDIKAN SOE

Dens E. S. I. Asbanu ¹⁾, Diana Rochintaniawati ^{*2)}, Riandi ³⁾, Parlindungan Sinaga ⁴⁾

^{1,2,3)} Prodi Doktor Pendidikan IPA, FPMIPA, Universitas Pendidikan Indonesia,

Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

^{*}Penulis korespondensi

e-mail: dianarochintaniawti@upi.edu

Article history:

Submitted: March 15th, 2025; Revised: April 12th, 2025; Accepted: May 10th, 2025; Published: July 18th, 2025

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis tantangan dan strategi dalam mengintegrasikan simulasi komputer ke dalam perkuliahan fisika statistik di daerah terpencil, dengan studi kasus di Pulau Timor. Penelitian ini menggunakan metode campuran dengan teknik analisis terhadap rencana pembelajaran semester (RPS), wawancara dengan dosen, observasi perkuliahan, dan survei persepsi mahasiswa. Hasil analisis RPS menunjukkan bahwa materi fisika statistik, seperti entropi, fungsi partisi, dan distribusi energi, belum terintegrasi dengan simulasi komputer. Tantangan utama yang dihadapi dosen dalam mengajar fisika statistik adalah terbatasnya akses ke simulasi komputer untuk menjelaskan konsep-konsep abstrak serta rendahnya kemampuan matematika mahasiswa. Wawancara dan survei terhadap mahasiswa mengungkapkan bahwa mereka mengalami kesulitan dalam memahami konsep abstrak dan persamaan kompleks. Baik dosen maupun mahasiswa mengakui bahwa simulasi komputer dapat memvisualisasikan konsep fisika secara efektif, namun penerapannya masih kurang optimal. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan pengayaan materi dengan aplikasi yang relevan, peningkatan akses terhadap simulasi, serta pengembangan pendekatan pembelajaran berbasis multi representasi (grafis, numerik, tabel, dan simulasi). Berdasarkan temuan ini, disarankan pengembangan strategi pedagogis dalam pembelajaran fisika statistik yang mengintegrasikan simulasi komputer menggunakan *Excel*, *Python*, dan *Scilab* untuk memvisualisasikan konsep-konsep abstrak. Implementasi strategi ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman konsep secara mendalam serta mendorong kreativitas dalam pemecahan masalah oleh mahasiswa.

Kata Kunci: Fisika statistik; simulasi komputer; multi representasi; pemahaman konsep

PENDAHULUAN

Kurikulum berbasis *Outcome-Based Education (OBE)* menekankan pentingnya pembelajaran yang berorientasi pada pencapaian luaran dengan capaian kompetensi yang jelas (Tam, 2014). Implementasi kurikulum ini diharapkan memberikan pengalaman belajar yang bermakna bagi mahasiswa, khususnya melalui integrasi teknologi sebagai respons terhadap kebutuhan pembelajaran abad ke-21 di pendidikan tinggi (Jairo & Andrés, 2024).

Dalam pembelajaran fisika di perguruan tinggi, integrasi teknologi memainkan peran penting dalam memfasilitasi pemahaman konsep-konsep abstrak (Banda & Nzabahimana, 2021). Simulasi komputer memungkinkan visualisasi yang lebih jelas atas konsep-konsep tersebut serta menyediakan laboratorium virtual bagi mahasiswa untuk mengeksplorasi dan berlatih keterampilan saintifik (Sanjari & Manouchehri, 2024). Selain itu, simulasi komputer membantu mahasiswa mengembangkan keterampilan berpikir kritis (Abdullah *et al.*, 2020),

kreatif (Simanjuntak, 2021), dan pemecahan masalah (Chen *et al.*, 2024) yang relevan dengan pembelajaran fisika modern.

Fisika statistik merupakan bagian dari kajian fisika lanjut yang mencakup materi abstrak dan matematika kompleks. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa mahasiswa, baik di tingkat sarjana maupun pascasarjana, mengalami kesulitan dalam memahami konsep-konsep fisika statistik, seperti entropi, keadaan makroskopik dan mikroskopik (Koerfer & Gregorcic, 2024), hubungan faktor Boltzmann dengan kerapatan keadaan (Smith *et al.*, 2013), serta hubungan faktor Boltzmann dengan fungsi partisi (Smith *et al.*, 2015). Selain itu, ditemukan juga miskonsepsi mahasiswa mengenai konsep energi Fermi dan distribusi energi Fermi (Justice, 2020; Sharma & Ahluwalia, 2012).

Konsep-konsep fisika statistik mendasari berbagai pengembangan teknologi modern, seperti kecerdasan buatan (machine learning) dan algoritma deep learning (Bahri *et al.*, 2020). Fisika statistik juga digunakan dalam pemodelan distribusi lalu lintas dan mendukung desain algoritma lalu lintas yang adaptif (Furtlehner, 2020; Jerath *et al.*, 2015). Selain itu, konsep-konsep ini diterapkan untuk memodelkan optimalisasi adsorben dalam mengurangi polutan pada air limbah (Pang *et al.*, 2019; Sharafie *et al.*, 2022).

Konsep-konsep distribusi pada fisika statistik melibatkan konsep seperti entropi, fungsi partisi, dan distribusi energi yang relevan dengan perkembangan teknologi modern. Namun, beberapa penelitian

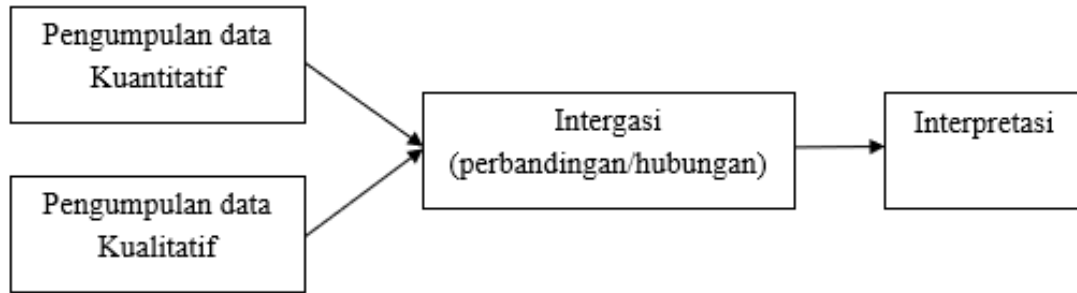
mengungkapkan bahwa mahasiswa masih menghadapi kesulitan dalam memahami konsep-konsep ini secara mendalam. Walaupun simulasi komputer telah terbukti membantu visualisasi dan pemahaman konsep, studi yang mengkaji strategi implementasi simulasi komputer secara spesifik dalam pembelajaran fisika statistik masih terbatas.

Berdasarkan kesenjangan ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kurikulum perguruan tinggi terkait integrasi simulasi komputer dalam fisika statistik, sekaligus menawarkan rekomendasi implementasi yang bertujuan meningkatkan kompetensi mahasiswa dalam memahami konsep-konsep inti fisika statistik.

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah *mix method convergent parallel design* (Creswell, 2014). Desain ini digunakan karena pengumpulan data kuantitatif dan kualitatif secara paralel, dianalisis secara terpisah lalu diintegrasikan untuk interpretasi hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Teknik pengumpulan data dengan teknik dokumentasi, observasi, wawancara, dan survei. Dokumentasi dilakukan melalui analisis Rencana Pembelajaran Semester (RPS), observasi pelaksanaan perkuliahan, wawancara dengan dosen dan mahasiswa, serta survei persepsi mahasiswa terhadap perkuliahan fisika statistik. Survei persepsi mahasiswa tentang perkuliahan fisika statistik dilakukan secara online melalui *google form*.



Gambar 1. *Mix method convergent parallel design*

Penelitian ini dilaksanakan pada program studi Pendidikan Fisika di salah satu perguruan tinggi di Pulau Timor, Provinsi NTT. Subjek penelitian terdiri dari 2 dosen pengampu mata kuliah fisika statistik dan 20 mahasiswa yang telah mengikuti mata kuliah tersebut. Teknik analisis data menggunakan metode deskriptif kuantitatif dan triangulasi data kualitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data kualitatif diawali dengan studi dokumentasi untuk dokumen RPS mata kuliah fisika statistik, kemudian dianalisis dan hasilnya seperti ditunjukkan pada Tabel. 1.

Tabel 1. Hasil analisis RPS

No	Aspek/Komponen RPS	Indikator Ketercapaian	Deskripsi Temuan	Catatan Kesimpulan
1	Tujuan pembelajaran	Memahami ruang lingkup fisika statistik	Mahasiswa harus dapat menjelaskan pengertian fisika statistik, batasannya, serta kedudukannya dalam ilmu fisika	Tujuan pembelajaran sudah terdefinisi jelas dengan indikator yang mengarah pada pemahaman dasar fisika statistik
2	Materi Pembelajaran	Pengantar fisika statistik, Tinjauan termodinamika, Konsep probabilitas, Ensemble	Materi mencakup topik-topik penting dalam fisika statistik dan termodinamika, yang relevan untuk memahami hubungan makro dan mikroskopik	Materi sudah komprehensif namun perlu tambahan contoh aplikasi dalam kehidupan nyata untuk memperkaya pemahaman
3	Metode Pembelajaran	Diskusi, ekspositori, dan tanya jawab	Penggunaan metode diskusi dan ekspositori dominan, sesuai dengan pendekatan yang diperlukan dalam memahami konsep teori fisika statistik	Metode yang digunakan cocok, namun ada ruang untuk menambah interaktivitas dengan menggunakan simulasi atau teknologi lainnya

4	Evaluasi	Kuis, UTS, UAS, Penugasan Soal Uraian	Evaluasi dilakukan dengan berbagai jenis penilaian, mencakup tes formatif dan sumatif, serta soal uraian untuk mendalami pemahaman	Evaluasi sudah memadai untuk mengukur pemahaman, tetapi perlu dipertimbangkan tambahan evaluasi berbasis aplikasi atau proyek yang terintegrasi teknologi
5	Media Pembelajaran	Media luring (kelas tatap muka)	Pembelajaran dilakukan secara luring dengan interaksi langsung antara dosen dan mahasiswa, menggunakan papan tulis dan presentasi	Media yang digunakan cocok, namun dapat ditingkatkan dengan menambahkan perangkat lunak simulasi
6	Keterkaitan dengan Teknologi	Tidak ada penggunaan teknologi pembelajaran selain media luring	Pembelajaran fisika statistik tidak terintegrasi dengan teknologi canggih dalam simulasi atau penggunaan software khusus	RPS dapat dipertimbangkan untuk mengintegrasikan teknologi seperti simulasi komputer atau aplikasi berbasis fisika untuk memperkaya pengalaman belajar

Data kualitatif wawancara dengan dosen mengenai pelaksanaan perkuliahan, integrasi simulasi komputer, tantangan dalam mengajar, serta kesulitan mahasiswa yang paling sering diamati. Selain itu, survei persepsi mahasiswa mencakup keterlibatan dalam pembelajaran, kesulitan yang dialami, akses terhadap simulasi komputer, interaksi dengan dosen, dan kejelasan instruksi selama perkuliahan.

Berdasarkan hasil analisis RPS ditemukan bahwa materi pembelajaran sudah mencakup aspek penting fisika statistik, namun sebaiknya ditambah contoh aplikasi dari berbagai disiplin ilmu untuk memperkaya relevansi dan pemahaman mahasiswa. Metode pengajaran sesuai, namun integrasi teknologi, seperti simulasi komputer dan analisis data, dapat meningkatkan keterlibatan dan pemahaman mahasiswa. Evaluasi sudah bervariasi, namun perlu ditambah format berbasis

teknologi untuk memperkaya pengalaman belajar, seperti tugas berbasis simulasi atau perangkat lunak. Pengembangan pemahaman konsep didominasi latihan soal, namun perlu penyajian konsep dalam berbagai representasi (grafis, numerik, simbolik) dan lebih menekankan keterampilan creative problem solving melalui masalah kontekstual.

Berdasarkan hasil wawancara dengan dosen pengasuh matakuliah diperoleh informasi bahwa perkuliahan fisika statistik dilakukan melalui penjelasan materi oleh dosen, diikuti dengan latihan soal yang dikerjakan dalam diskusi kelompok dan presentasi kelompok. Mahasiswa aktif berpartisipasi dalam diskusi. Namun, pemahaman mahasiswa terhadap konsep-konsep fisika dan pemecahan masalah seringkali terkendala oleh materi yang abstrak dan keterbatasan kemampuan matematika mahasiswa. Oleh karena itu,

latihan soal perlu diperbanyak, dan bimbingan mahasiswa sering dilakukan di luar perkuliahan, sehingga jumlah pertemuan melebihi 16 kali tatap muka. Pengalaman dosen dalam menggunakan simulasi teknologi, terutama simulasi komputer, masih terbatas. Namun, saya

percaya bahwa penggunaan simulasi dapat sangat membantu mahasiswa dalam memahami konsep-konsep fisika. Pada Tabel 2 disajikan hasil survei persepsi mahasiswa tentang perkuliahan fisika statistik.

Tabel 2. Survei Respons Mahasiswa

Pernyataan	STS	TS	Netral	S	SS
Saya merasa terlibat aktif dalam proses pembelajaran	0%	0%	29%	29%	43%
Saya sulit memahami konsep-konsep abstrak	0%	0%	29%	43%	29%
Saya sulit memahami persamaan-persamaan matematika	0%	0%	14%	43%	43%
Saya tidak memiliki akses yang memadai terhadap simulasi komputer	0%	0%	29%	29%	43%
Interaksi saya dengan dosen baik	0%	0%	57%	14%	29%
Instruksi yang diberikan oleh dosen jelas dan mudah dipahami	0%	0%	14%	29%	57%

Semester (RPS), wawancara dengan dosen, dan survei persepsi mahasiswa, terdapat berbagai temuan yang memberikan pandangan komprehensif mengenai kualitas perkuliahan fisika statistik serta tantangan yang dihadapi dalam proses pembelajaran. Temuan-temuan ini mengarah pada beberapa rekomendasi untuk memperkaya materi, metode pengajaran, serta peningkatan pemahaman mahasiswa terhadap fisika statistik.

Berdasarkan analisis RPS, pembelajaran fisika statistik telah mencakup aspek-aspek dasar yang penting. Namun, relevansi materi dengan fisika statistik dengan kehidupan nyata masih kurang dioptimalkan dalam pembelajaran. Padahal, fisika statistik banyak diaplikasikan perkembangan teknologi modern seperti kecerdasan buatan dan deep learning (Bahri *et al.*, 2020), pemodelan distribusi lalu lintas dengan kontrol yang adaptatif, pemodelan optimasi adsorben untuk mengurangi polutan di air limbah,

dan pemodelan absorpsi zat warna pada biomasa (Farhan *et al.*, 2018; Lamine, 2017; Pang *et al.*, 2019; Sozbilir, 2003).

Analisis metode pengajaran pada RPS menunjukkan bahwa dosen menerapkan metode pembelajaran yang sesuai dengan kebutuhan pembelajaran. Meski demikian, perkuliahan terintegrasi teknologi simulasi komputer dan analisis data masih kurang. Pemanfaatan teknologi seperti perangkat lunak simulasi dapat memberikan visualisasi konsep-konsep abstrak yang sulit dipahami (Cai *et al.*, 2021; Challenor & Ma, 2019). Simulasi komputer memungkinkan mahasiswa untuk melihat perubahan variabel secara langsung dan memahami hubungan antara variabel dalam fisika (Develaki, 2019; Rosenberg & Lawson, 2019).

Selain itu, penggunaan analisis data dalam pembelajaran akan memperkaya pengalaman mahasiswa dengan mengaitkan konsep fisika statistik dengan

data nyata. Misalnya, dalam mempelajari distribusi partikel, mahasiswa dapat mengolah data yang relevan dan menganalisisnya menggunakan perangkat lunak. Dengan demikian, integrasi teknologi ini tidak hanya akan membantu mahasiswa dalam memahami konsep-konsep abstrak, tetapi juga membekali mereka dengan keterampilan yang relevan di dunia kerja (Becker *et al.*, 2020; Tsivitanidou *et al.*, 2021).

Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa metode evaluasi yang diterapkan sudah cukup bervariasi, namun masih berfokus pada latihan soal konvensional. Menambah format evaluasi berbasis teknologi, seperti tugas yang menggunakan simulasi komputer atau perangkat lunak lain, dapat memberikan variasi yang lebih kaya dalam menilai pemahaman mahasiswa (K. D. Wang *et al.*, 2023; Zhai *et al.*, 2020). Evaluasi berbasis simulasi memungkinkan mahasiswa untuk mengaplikasikan konsep dalam situasi virtual (Chernikova *et al.*, 2020; Ke & Xu, 2020) sehingga dapat meningkatkan keterampilan mereka dalam menyelesaikan masalah nyata.

Selain itu, penerapan multiple representations (grafis, numerik, dan simbolik) memiliki peran penting dalam mendukung mahasiswa untuk memahami konsep secara mendalam. Pendekatan ini membantu mahasiswa memvisualisasikan konsep-konsep abstrak sekaligus menjembatani kesenjangan antara teori dan aplikasi. Sebagai ilustrasi, konsep distribusi energi dapat direpresentasikan melalui grafik, persamaan matematis, dan visualisasi berbasis simulasi, yang memungkinkan mahasiswa untuk memahami keterkaitan di antara berbagai

bentuk representasi tersebut. Penggunaan representasi yang beragam, seperti kombinasi gambar, teks, dan grafik, juga dapat mengurangi beban kognitif, sehingga meningkatkan pemahaman konsep dan memperpanjang retensi informasi secara signifikan (Musil *et al.*, 2021; Thees *et al.*, 2020).

Berdasarkan wawancara dengan dosen, disampaikan bahwa mahasiswa sering mengalami kesulitan dalam memahami konsep-konsep fisika yang abstrak, terutama karena keterbatasan kemampuan matematika. Hal ini juga didukung oleh hasil survei yang menunjukkan bahwa sebanyak 43% mahasiswa merasa kesulitan dalam memahami persamaan-persamaan matematika yang digunakan dalam fisika statistik. Untuk mengatasi tantangan ini, dosen perlu memperkaya latihan soal yang sesuai dengan kemampuan mahasiswa. Latihan soal tambahan akan membantu mahasiswa meningkatkan pemahaman dan kemampuan matematis mahasiswa. Penyederhanaan matematika kompleks memudahkan mahasiswa memahami fisika statistik. Misal menurunkan fungsi partisi menggunakan deret Mac Laurin (Fernández, 2015), derivasi persamaan Boltzmann sistem mikrokanonik (Müller, 2014), dan menggunakan analogi hewan identik untuk menjelaskan distribusi Bose Einstein (Beltran, 2023).

Namun, tantangan dalam memahami abstraksi fisika statistik bukan hanya masalah matematika, tetapi juga bagaimana materi disajikan. Oleh karena itu, selain latihan soal, dosen juga perlu menerapkan strategi pembelajaran yang menekankan pada konsep-konsep yang dapat diilustrasikan dalam bentuk visual atau

melalui simulasi. Penggunaan teknologi seperti simulasi akan membantu mahasiswa "melihat" proses abstrak secara konkret, misalnya penerapan spreadsheet excel untuk simulasi konsep distribusi Boltzmann dan energi Fermi (Engelhardt *et al.*, 2015; Jameson & Brüscheweiler, 2020; Sharma & Ahluwalia, 2012)

Salah satu hambatan yang dihadapi dalam perkuliahan fisika statistik adalah keterbatasan akses terhadap simulasi komputer. Dari hasil wawancara, dosen menyatakan bahwa pengalaman dalam menggunakan simulasi komputer masih terbatas, meskipun beliau percaya bahwa teknologi ini dapat mendukung pembelajaran. Di sisi lain, hasil survei mahasiswa menunjukkan bahwa sebanyak 43% mahasiswa merasa tidak memiliki akses yang memadai terhadap simulasi komputer. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk menyediakan akses yang lebih luas terhadap simulasi, baik melalui platform daring yang dapat diakses oleh mahasiswa secara mandiri maupun perangkat lunak yang disediakan di laboratorium komputer kampus.

Penyediaan simulasi komputer bermanfaat tidak hanya bagi mahasiswa, tetapi juga bagi dosen sebagai alat bantu mengajar (W. Wang *et al.*, 2023). Untuk memastikan integrasi yang efektif dalam pembelajaran, pelatihan dosen dalam penggunaan simulasi sangat penting. Penggunaan simulasi komputer telah terbukti meningkatkan minat mahasiswa dalam belajar (Abdulrahman *et al.*, 2020). Selain itu, penerapan simulasi sebagai bagian integral dari perkuliahan membantu mahasiswa mengatasi kesulitan dalam memahami fisika statistik.

Penelitian ini menyoroti pentingnya meningkatkan keterampilan pemecahan masalah kreatif pada mahasiswa, yang selama ini lebih sering dilatih melalui soal berbasis formula standar. Untuk itu, dosen dapat merancang pembelajaran yang mendorong keterlibatan aktif mahasiswa, seperti analisis grafik distribusi Maxwell-Boltzmann, pengembangan simulasi komputer menggunakan Scilab atau Python untuk memahami hubungan suhu dengan distribusi dan energi kinetik molekul, serta simulasi pengaruh suhu terhadap distribusi energi Fermi. Penggunaan multiple representation juga penting untuk mempermudah pemahaman konsep.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, perkuliahan fisika statistik telah mencakup konsep penting, namun masih perlu perbaikan. Pembelajaran dapat ditingkatkan dengan menambahkan materi relevan, mengintegrasikan simulasi komputer untuk memvisualisasikan konsep abstrak, dan menerapkan metode evaluasi beragam. Tantangan berupa abstraksi konsep dan keterbatasan pemahaman matematika mahasiswa dapat diatasi melalui latihan soal variatif dan pendekatan multiple representasi. Peningkatan akses simulasi komputer serta pelatihan dosen dalam penggunaannya akan mendukung desain strategi pembelajaran yang lebih efektif. Penerapan simulasi komputer diharapkan meningkatkan keterlibatan mahasiswa, pemahaman konsep mendalam, serta keterampilan pemecahan masalah kreatif, sehingga mahasiswa tidak hanya memahami teori, tetapi juga mampu mengaplikasikan fisika statistik dalam berbagai konteks.

REFERENSI

- Abdullah, K., Gharibi, A., & Arulappan, J. (2020). *Repeated Simulation Experience on Self-Confidence, Critical Thinking, and Competence of Nurses and Nursing Students — An Integrative Review*. <https://doi.org/10.1177/2377960820927377>
- Abdulrahman, M. D., Faruk, N., Oloyede, A. A., Surajudeen-bakinde, N. T., & Olawoyin, L. A. (2020). Heliyon Multimedia tools in the teaching and learning processes: A systematic review. *Heliyon*, 6(11), e05312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05312>
- Bahri, Y., Kadmon, J., Pennington, J., Schoenholz, S. S., Sohl-dickstein, J., & Ganguli, S. (2020). Statistical Mechanics of Deep Learning. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 501–528.
- Banda, H. J., & Nzabahimana, J. (2021). Effect of integrating physics education technology simulations on students' conceptual understanding in physics: A review of literature. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 23108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023108>
- Becker, S., Klein, P., Gößling, A., & Kuhn, J. (2020). Using mobile devices to enhance inquiry-based learning processes ☆. *Learning and Instruction*, 69(June), 101350. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2020.101350>
- Beltran, L. (2023). Quantum Bose–Einstein Statistics for Indistinguishable Concepts in Human Language. *Foundations of Science*, 28(1), 43–55. <https://doi.org/10.1007/s10699-021-09794-1>
- Cai, S., Liu, C., Wang, T., Liu, E., & Liang, J. (2021). Effects of learning physics using Augmented Reality on students' self-efficacy and conceptions of learning. *British Journal of Educational Technology*, 52(1), 235–251. <https://doi.org/10.1111/bjet.13020>
- Challenor, J., & Ma, M. (2019). A Review of Augmented Reality Applications for History Education and Heritage Visualisation. *Multimodal Technologies and Interaction*. <https://doi.org/10.3390/mti3020039>
- Chen, M. J., She, H. C., & Tsai, P. Y. (2024). The effects of online simulation-based collaborative problem-solving on students' problem-solving, communication and collaboration attitudes. In *Education and Information Technologies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12609-y>
- Chernikova, O., Heitzmann, N., Stadler, M., Holzberger, D., Seidel, T., & Fischer, F. (2020). Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 90(4), 499–541. <https://doi.org/10.3102/0034654320933544>
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (Fourth Edi). Sage Publication.
- Develaki, M. (2019). Methodology and Epistemology of Computer Simulations and Implications for Science Education. *Journal of Science Education and Technology*.
- Engelhardt, L., Lopez del Puerto, M., & Chonacky, N. (2015). Simple and synergistic ways to understand the Boltzmann distribution function. *American Journal of Physics*, 83(9), 787–793. <https://doi.org/10.1119/1.4923204>
- Farhan, S., Sharafee, M., Ismail, S., Bonilla-petriciolet, A., Ben, A., & Erto, A. (2018). Synthesis and characterization of a novel amphoteric adsorbent coating for anionic and cationic dyes adsorption :

- Experimental investigation and statistical physics modelling. *Chemical Engineering Journal*, 351(June), 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.092>
- Fernández, F. M. (2015). A simple way of approximating the canonical partition functions in statistical mechanics. *European Journal of Physics*, 36(5), 55026. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/36/5/055026>
- Furtlehner, C. (2020). *Statistical physics methods for machine learning and traffic forecasting*. HAL open science. <https://inria.hal.science/tel-02917159v1/document>
- Jairo, J., & Andrés, J. (2024). The AI - driven classroom : A review of 21st century curriculum trends. *PROSPECTS*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11125-024-09704-w>
- Jameson, G., & Brüschweiler, R. (2020). Active Learning Approach for an Intuitive Understanding of the Boltzmann Distribution by Basic Computer Simulations. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3910–3913. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00559>
- Jerath, K., Ray, A., Brennan, S., & Gayah, V. V. (2015). Dynamic Prediction of Vehicle Cluster Distribution in Mixed Traffic: A Statistical Mechanics-Inspired Method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 1–11.
- Justice, P. (2020). Student understanding of Fermi energy, the Fermi-Dirac distribution and total electronic energy of a free electron gas. *European Journal of Physics*, 41(1). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab537c>
- Ke, F., & Xu, X. (2020). Virtual reality simulation-based learning of teaching with alternative perspectives taking. *British Journal of Educational Technology*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1111/bjet.12936>
- Koerfer, E., & Gregorcic, B. (2024). Exploring student reasoning in statistical mechanics: Identifying challenges in problem-solving groups. *Physical Review Physics Education Research*, 20(1), 10105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010105>
- Lamine, A. Ben. (2017). Adsorption of diclofenac and nimesulide on activated carbon: Statistical physics modeling and effect of adsorbate size. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.05.019>
- Müller, R. (2014). The Boltzmann factor: A simplified derivation. *European Journal of Physics*, 35(5). <https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/5/055002>
- Musil, F., Grisa, A., Bart, A. P., Ortner, C., & Ceriotti, M. (2021). Physics-Inspired Structural Representations for Molecules and Materials. *Chemical Reviews*. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00021>
- Pang, X., Sellaoui, L., Franco, D., Dotto, G. L., Georgin, J., Bajahzar, A., Belmabrouk, H., Lamine, A. Ben, & Li, Z. (2019). Research Institute of Advanced Interdisciplinary , College of Life Sciences , Qingdao Laboratory of Quantum and Statistical Physics , LR18ES18 , Monastir University , Faculty of Chemical Engineering Department , Federal University of Santa Maria – UFSM , 1000 , of Physics , College of Science at Al Zulfi , Majmaah University , Saudi Arabia. *Chemical Engineering Journal*, 122101. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122101>
- Rosenberg, J. M., & Lawson, M. A. (2019). education sciences An Investigation of Students ' Use of a Computational Science Simulation in an Online High School Physics Class. *Education Sciences*, 1–19. <https://doi.org/10.3390/educsci9010049>
- Sanjari, A., & Manouchehri, A. (2024). *education sciences Interactive*

- Learning : Unpacking the Influence of Computer Simulations on Students ' Mathematical Modeling Processes.*
- Sharafee, M., Farhan, S., Sellaoui, L., Badawi, M., Bonilla-petriciolet, A., & Ismail, S. (2022). Performance and interactions of diclofenac adsorption using Alginate / Carbon-based Films : Experimental investigation and statistical physics modelling. *Chemical Engineering Journal*, 428(June 2021), 131929. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131929>
- Sharma, S., & Ahluwalia, P. K. (2012). Diagnosing alternative conceptions of Fermi energy among undergraduate students. *European Journal of Physics*, 33(4), 883–895. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/4/883>
- Simanjuntak, M. P. (2021). *Effectiveness of Problem-Based Learning Combined with Computer Simulation on Students ' Problem-Solving and Creative Thinking Skills.* 14(3), 519–534.
- Smith, T. I., Mountcastle, D. B., & Thompson, J. R. (2013). Identifying student difficulties with conflicting ideas in statistical mechanics. *AIP Conference Proceedings*, 1513, 386–389. <https://doi.org/10.1063/1.4789733>
- Smith, T. I., Mountcastle, D. B., & Thompson, J. R. (2015). Student understanding of the Boltzmann factor. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020123>
- Sozibilir, M. (2003). What's student's understanding from entropy: A Review of selected literature. *Journal of Baltic Science Education*, 1, 21–27.
- Tam, M. (2014). Outcomes-based approach to quality assessment and curriculum improvement in higher education. *Quality Assurance in Education*, 22(2), 158–168. <https://doi.org/10.1108/QAE-09-2011-0059>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., & Lukowicz, P. (2020). Computers in Human Behavior Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Tsivitanidou, O. E., Georgiou, Y., & Ioannou, A. (2021). A Learning Experience in Inquiry - Based Physics with Immersive Virtual Reality : Student Perceptions and an Interaction Effect Between Conceptual Gains and Attitudinal Profiles. *Journal of Science Education and Technology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09924-1>
- Wang, K. D., Mai, J., Tanja, C., & Bumbacher, E. (2023). A systematic review of empirical studies using log data from open-ended learning environments to measure science and engineering practices. *British Journal of Educational Technology*, March 2022, 192–221. <https://doi.org/10.1111/bjet.13289>
- Wang, W., Xu, K., Niu, H., & Miao, X. (2023). *Retracted : Emotion Recognition of Students Based on Facial.* 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4065207>
- Zhai, X., Nehm, R. H., & Urban-lurain, M. (2020). From substitution to redefinition : A framework of machine learning-based science assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, July 2019. <https://doi.org/10.1002/tea.21658>