

Transformasi Pendidikan Biologi Melalui STEM-Digital Coding: Tren Global, Tantangan, dan Arah Riset Masa Depan

Hepta Bungsu Agung Jayawardana^{1,*}

¹) Pendidikan Biologi, Universitas PGRI Argopuro Jember, Jl. Jawa No. 10 Jember

^{*}) Email corresponding author: hepta2011@gmail.com

Submitted: 22/12/2025

Accepted: 29/12/2025

Published: 31/12/2025

Abstrak

Integrasi coding dalam pembelajaran Biologi berbasis STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) merupakan inovasi pedagogis yang menjanjikan untuk mengembangkan keterampilan berpikir komputasi (*Computational Thinking*) siswa di abad ke-21. Meskipun popularitasnya meningkat, pemetaan komprehensif mengenai efektivitas dan hambatan implementasinya masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren publikasi global, model implementasi, serta tantangan integrasi digital coding dalam pendidikan biologi. Menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pedoman PRISMA, penelitian ini meninjau artikel terpilih dari database bereputasi (Scopus dan Web of Science) yang diterbitkan dalam satu dekade terakhir. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan tren publikasi yang signifikan, dengan fokus dominan pada penggunaan *block-based coding* (seperti *Scratch* dan *NetLogo*) untuk memodelkan sistem biologis kompleks, khususnya dinamika ekosistem. Temuan studi mengonfirmasi bahwa pendekatan ini efektif dalam memvisualisasikan konsep abstrak dan meningkatkan kemampuan pemecahan masalah siswa. Namun, tantangan utama yang teridentifikasi meliputi kurangnya kompetensi digital guru (*teacher readiness*) dan keterbatasan infrastruktur kurikulum. Penelitian ini merekomendasikan perlunya pengembangan modul pelatihan guru yang adaptif dan penelitian lebih lanjut terkait asesmen berbasis coding sebagai agenda prioritas masa depan.

Kata Kunci: Pendidikan Biologi, STEM, Digital Coding, Berpikir Komputasi, Systematic Literature Review

Abstract

Integrating coding into STEM-based Biology learning represents a promising pedagogical innovation to foster students' Computational Thinking (CT) skills in the 21st century. Despite its growing popularity, a comprehensive mapping of its effectiveness and implementation barriers remains limited. This study aims to analyze global publication trends, implementation models, and challenges of integrating digital coding within biology education. Employing a Systematic Literature Review (SLR) method following PRISMA guidelines, this article reviews selected papers from reputable databases (Scopus and Web of Science) published over the last decade. The analysis reveals a significantly increasing publication trend, primarily focusing on the use of block-based coding (such as Scratch and NetLogo) to model complex biological systems, particularly ecosystem dynamics. The findings confirm that this approach effectively visualizes abstract concepts and enhances students' problem-solving abilities. However, major challenges identified include a lack of teacher digital competency (teacher readiness) and curriculum infrastructure constraints. This study recommends the development of adaptive teacher training modules and further research on coding-based assessment as priority agendas for future research.

Keywords: Biology Education, STEM, Digital Coding, Computational Thinking, Systematic Literature Review

PENDAHULUAN

Di era pasca-pandemi dan percepatan transformasi digital, paradigma pendidikan sains global mengalami pergeseran signifikan menuju integrasi literasi komputasi. Pendidikan Biologi tidak lagi terbatas pada penguasaan konsep faktual, tetapi kini dituntut untuk mengembangkan keterampilan berpikir sistem (*systems thinking*) dan berpikir komputasi

(*computational thinking*) sebagai kompetensi esensial (Parrish et al., 2022; Weintrop et al., 2021). Dalam kerangka kerja STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*), penggunaan teknologi telah berevolusi dari sekadar alat presentasi menjadi instrumen kognitif melalui aktivitas coding atau pemrograman, yang terbukti mampu meningkatkan kemampuan penalaran ilmiah siswa secara signifikan (Krell et al., 2023).

Namun, pembelajaran Biologi menghadapi tantangan inheren dalam mengajarkan konsep yang kompleks dan dinamis, khususnya materi dinamika ekosistem. Fenomena ekologis sering kali melibatkan interaksi non-linear yang terjadi pada skala waktu dan ruang yang sulit diamati langsung di kelas (Bielik et al., 2021). Metode konvensional sering kali gagal memvisualisasikan dampak kausalitas jangka panjang, seperti efek umpan balik (*feedback loops*) dalam rantai makanan. Studi terbaru menekankan bahwa pendekatan berbasis simulasi dan coding adalah solusi paling potensial untuk mengatasi hambatan abstraksi ini (Dabholkar & Wilensky, 2022).

Integrasi digital coding memungkinkan siswa beralih peran dari konsumen pasif menjadi "perancang model". Melalui *platform block-based coding* seperti *Scratch* atau *NetLogo*, siswa dapat membangun simulasi ekosistem mereka sendiri, memanipulasi variabel lingkungan, dan mengamati pola yang muncul secara real-time (Swanson et al., 2024). Riset oleh Leonard et al. (2023) menunjukkan bahwa ketika siswa memprogram agen biologis (misalnya predator dan mangsa) menggunakan algoritma sederhana, mereka tidak hanya memahami konsep keseimbangan ekologis lebih dalam, tetapi juga mengembangkan literasi data yang krusial untuk sains modern.

Meskipun urgensi integrasi ini semakin menguat, peta literatur mengenai topik ini masih menunjukkan kesenjangan. Tinjauan sistematis yang ada saat ini lebih banyak berfokus pada efektivitas STEM secara umum atau robotika dalam Fisika (Nadal et al., 2023), sementara kajian spesifik yang menghubungkan coding dengan pemahaman konsep biologis masih terbatas. Selain itu, masih sedikit studi yang secara komprehensif membedah tantangan teknis dan pedagogis—seperti kesiapan digital guru (*teacher readiness*)—yang menjadi penghambat utama implementasi kurikulum ini di berbagai negara berkembang (Starkey et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menganalisis perkembangan riset integrasi digital coding dalam pembelajaran Biologi selama satu dekade terakhir. Penelitian ini secara spesifik bertujuan untuk: (1) memetakan tren publikasi global dan distribusi geografis, (2) mengevaluasi efektivitas penggunaan coding dalam memvisualisasikan dinamika ekosistem, serta (3) mengidentifikasi tantangan implementasi guna merumuskan arah riset masa depan yang lebih adaptif.

METODE PENELITIAN

Desain penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, menilai, dan mensintesis temuan penelitian yang relevan terkait integrasi digital coding dalam pembelajaran Biologi berbasis STEM. Protokol penelusuran dan pelaporan data mengikuti pedoman PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan transparansi dan validitas metodologis. Alur PRISMA terdiri dari tiga tahap utama yaitu Identifikasi, Penyaringan (*Screening*), dan Inklusi (Page et al., 2021).

Sumber data dan Strategi Pencarian Pencarian literatur dilakukan pada basis data bereputasi yaitu Scopus, Web of Science (WoS), Garuda, dan Google Scholar. Database ini dipilih karena cakupannya yang luas terhadap jurnal pendidikan sains berkualitas tinggi dan kontrol kualitas yang ketat. Pencarian dilakukan pada bulan Januari 2026 dengan rentang waktu publikasi dibatasi pada dekade terakhir (2016–2025) untuk menangkap tren teknologi terkini.

Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dengan operator Boolean (AND, OR) sebagai berikut:

("Biology Education" OR "Biology Learning" OR "Science Education") AND ("STEM" OR "STEAM") AND ("Coding" OR "Programming" OR "Computational Thinking" OR "Agent-based modeling")

Kriteria Inklusi dan Eksklusi untuk menjamin relevansi artikel yang dianalisis, diterapkan kriteria seleksi yang ketat berdasarkan protokol *PICOS* (*Population, Intervention, Comparison, Outcomes, Study design*). Detail kriteria inklusi dan eksklusi disajikan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria	Inklusi (Diterima)	Eksklusi (Ditolak)
Tipe Dokumen	Artikel Jurnal (<i>Peer-reviewed</i>) dan Prosiding Bereputasi	Skripsi/Tesis/Disertasi, Buku Ajar, Artikel Populer/Blog, Dokumen Kebijakan
Bahasa	Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia	Bahasa selain Inggris/Indonesia
Timeline	Terbit antara 2016 – 2025	Terbit sebelum 2016
Kualitas (Khusus GS/Garuda)	Memiliki struktur IMRAD lengkap dan diterbitkan di jurnal/prosiding yang dapat dilacak	Artikel <i>draft</i> , <i>preprint</i> yang belum direview, atau jurnal predator
Topik	Integrasi <i>coding</i> pada materi Biologi (Ekosistem/Lingkungan)	<i>Coding</i> murni (CS), atau STEM tanpa unsur Biologi

Proses seleksi data dilakukan dalam tiga tahap: (1) Identifikasi, di mana duplikasi artikel dari Scopus dan WoS dihapus menggunakan perangkat lunak referensi (Zotero/Mendeley); (2) Screening, yaitu penapisan berdasarkan judul dan abstrak untuk membuang artikel yang tidak relevan; dan (3) Eligibility, yaitu membaca teks lengkap (full-text) untuk memastikan artikel membahas implementasi coding dalam konteks biologi/ekosistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan proses penelusuran dan seleksi menggunakan protokol PRISMA, diperoleh total 30 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Analisis mendalam terhadap artikel-artikel tersebut menghasilkan tiga tema utama: (1) Tren publikasi dan distribusi geografis, (2) Transformasi alat dan pedagogi dalam materi ekosistem, serta (3) Tantangan implementasi.

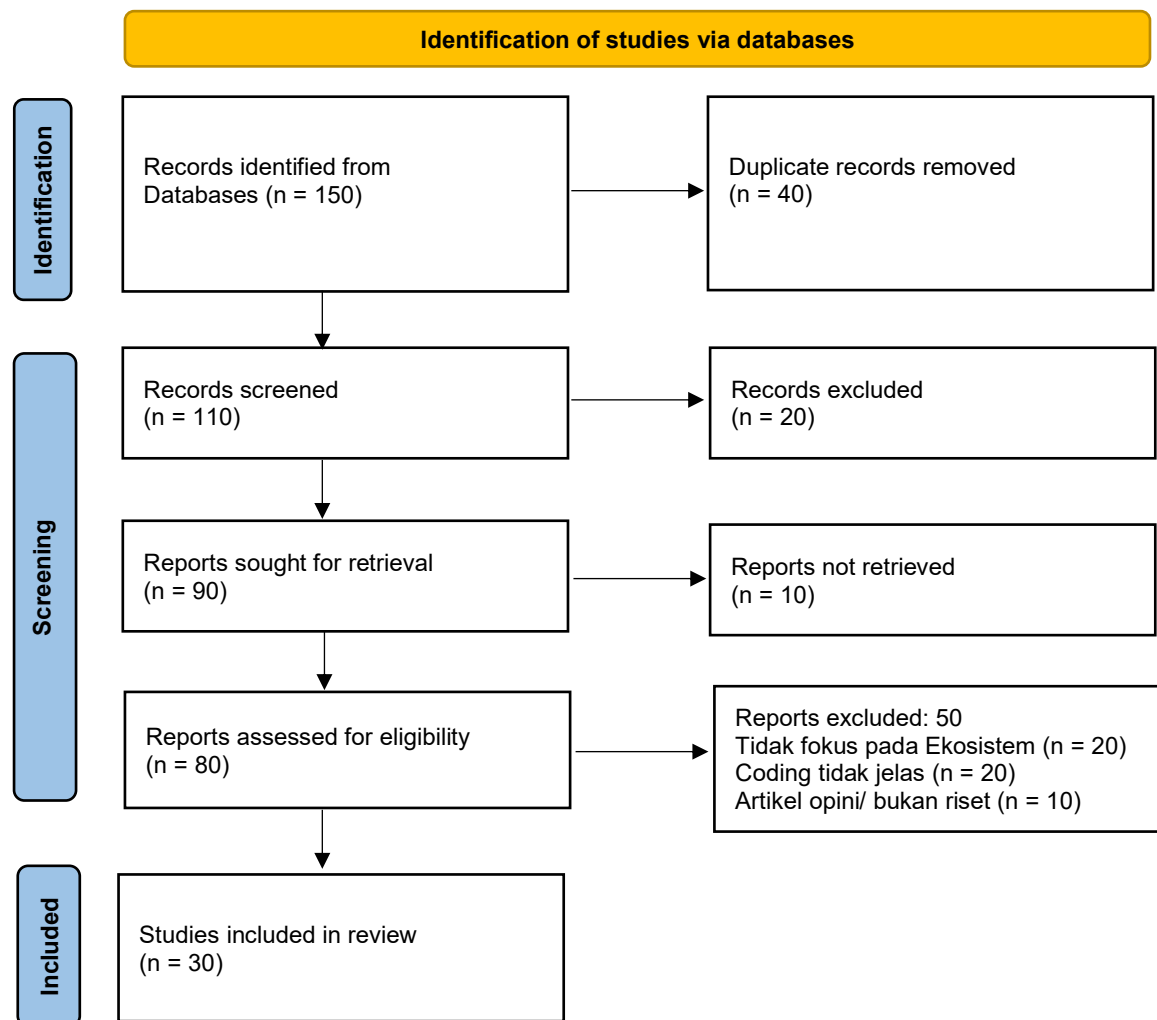
Tren Publikasi: Kesenjangan Riset Global dan Lokal

Analisis data menunjukkan peningkatan signifikan jumlah publikasi terkait integrasi coding dalam pembelajaran Biologi selama satu dekade terakhir (2016–2025). Puncak publikasi terlihat pada tahun 2023-2024, yang mengindikasikan bahwa topik ini mendapatkan momentum pasca-pandemi COVID-19, seiring dengan akselerasi transformasi digital di sektor pendidikan.

Menariknya, terdapat perbedaan karakteristik yang mencolok antara artikel yang terindeks di basis data bereputasi tinggi (Scopus/WoS) dengan basis data nasional/ regional (Garuda/ DOAJ). Literatur Global (Scopus/WoS) didominasi oleh studi dari negara maju (Amerika Serikat, Eropa, dan Asia Timur). Fokus riset cenderung pada pengembangan

teknologi baru (*design-based research*) dan validasi instrumen pengukuran kognitif yang kompleks. Sedangkan Literatur Nasional/Open Access (Garuda/ Google Scholar) didominasi oleh Penelitian Tindakan Kelas (PTK) atau eksperimen kuasi di sekolah-sekolah. Fokusnya lebih pragmatis, yaitu melihat dampak penggunaan tools yang sudah ada (seperti *Scratch*) terhadap hasil belajar siswa.

Temuan ini mengonfirmasi bahwa sementara peneliti global sibuk mengembangkan teori dan alat baru, praktisi di negara berkembang (termasuk Indonesia) sedang berjuang mengadaptasi teknologi tersebut ke dalam kurikulum lokal.



Gambar 1. Diagram PRISMA Penelitian
(Diadaptasi dari Page MJ, et al., 2021)

Transformasi Metodologi: Dari Hafalan ke Simulasi Ekosistem

Hasil tinjauan literatur menegaskan bahwa integrasi coding telah mengubah cara materi Dinamika Ekosistem diajarkan. Jika sebelumnya materi ini diajarkan melalui diagram statis (jaring-jaring makanan), coding memungkinkan pendekatan berbasis Pemodelan Berbasis Agen (*Agent-Based Modeling*). Dua platform utama yang paling mendominasi literatur adalah NetLogo dan Scratch.

NetLogo paling dominan di literatur internasional (Scopus). Platform ini disukai karena kemampuannya menyimulasikan ribuan "agen" (misal: rumput, domba, serigala) secara bersamaan. Studi menunjukkan bahwa NetLogo efektif membantu siswa memahami konsep "Emergence" (bagaimana pola kompleks muncul dari aturan sederhana) dan Keseimbangan Dinamis dalam ekosistem. Sedangkan Scratch lebih populer di literatur nasional (Garuda) dan pendidikan dasar (SD/SMP). Antarmuka blok warna-warni memudahkan siswa pemula untuk membuat animasi sederhana rantai makanan. Meskipun simulasinya tidak sekompleks NetLogo, Scratch terbukti efektif meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa.

Melalui kedua alat ini, siswa tidak lagi menghafal definisi "simbiosis" atau "kompetisi", melainkan memprogram perilaku hewan dan melihat konsekuensi logisnya terhadap populasi lingkungan. Ini adalah bukti nyata transformasi dari *Learning about Science* menjadi *Doing Science through Computational Thinking*.

Tantangan Implementasi: Kesiapan Guru dan Infrastruktur

Meskipun hasil belajar siswa menunjukkan tren positif, analisis literatur—terutama dari Google Scholar dan Garuda—mengungkapkan tantangan fundamental di lapangan yang dikategorikan menjadi tiga aspek yaitu Kesiapan Digital Guru (*Teacher Readiness*), Kendala Infrastruktur, dan Kekakuan Kurikulum.

Kesiapan Digital Guru (*Teacher Readiness*) adalah hambatan yang paling sering dilaporkan. Banyak guru Biologi merasa tidak memiliki kompetensi teknis dalam coding. Mereka memandang coding sebagai domain guru TIK/Informatika, sehingga terjadi resistensi psikologis untuk mengintegrasikannya dalam materi Biologi. Terkait kendala infrastruktur, studi di negara berkembang menyoroti ketimpangan akses perangkat. Pembelajaran berbasis coding membutuhkan rasio komputer siswa 1:1 yang ideal, namun realitas di banyak sekolah (khususnya di daerah rural) belum mendukung hal ini. Sedangkan kekakuan kurikulum, menunjukkan bahwa kurikulum yang padat konten (*content-heavy*) sering kali tidak menyisakan ruang waktu bagi siswa untuk melakukan proses debugging (memperbaiki kode error), yang sebenarnya merupakan inti dari proses berpikir komputasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR) menegaskan bahwa integrasi *digital coding* dalam pembelajaran Biologi berbasis STEM bukan sekadar tren sesaat, melainkan sebuah pergeseran paradigma pendidikan sains yang signifikan menuju penguasaan keterampilan abad ke-21. Tinjauan terhadap literatur global dan nasional menunjukkan peningkatan tren publikasi yang tajam pasca-pandemi, yang mengindikasikan urgensi digitalisasi dalam memvisualisasikan konsep biologis yang abstrak.

Secara spesifik, penelitian ini menyimpulkan tiga hal utama:

1. Transformasi Pedagogis: Penggunaan platform *block-based coding* seperti NetLogo dan Scratch terbukti efektif mengubah pembelajaran materi Dinamika Ekosistem dari sekadar hafalan fakta menjadi proses inkuiri berbasis simulasi. Siswa mampu memanipulasi variabel lingkungan untuk memahami konsep kompleks seperti *feedback loops* dan keseimbangan populasi.
2. Dualisme Alat: Terdapat distingsi penggunaan alat berdasarkan jenjang dan konteks;

NetLogo mendominasi riset global untuk pemodelan sistem kompleks di jenjang pendidikan menengah ke atas, sementara Scratch lebih populer dalam literatur nasional (Indonesia) sebagai alat pengantar logika algoritmik yang menarik bagi pemula.

3. Hambatan Utama: Keberhasilan implementasi masih sangat bergantung pada kesiapan digital guru (*teacher readiness*). Tantangan terbesar yang ditemukan bukanlah pada kemampuan siswa menguasai teknologi, melainkan pada kurangnya kompetensi pedagogis guru dalam mengaitkan logika *coding* dengan konsep biologi, serta keterbatasan infrastruktur di negara berkembang.

Implikasi dan Rekomendasi Temuan ini memberikan implikasi praktis bagi pembuat kebijakan kurikulum dan pendidik. Kurikulum Biologi masa depan perlu menyediakan ruang fleksibel bagi integrasi *Computational Thinking* (CT), tidak hanya sebagai mata pelajaran TIK terpisah, tetapi terintegrasi dalam substansi sains.

Untuk penelitian masa depan (*Future Research Directions*), disarankan untuk fokus pada tiga area yang masih jarang dieksplorasi:

1. Pengembangan instrumen asesmen yang valid untuk mengukur pemahaman konsep biologi dan keterampilan *coding* secara simultan, agar tidak terjadi tumpang tindih pengukuran.
2. Studi longitudinal untuk melihat dampak jangka panjang pembelajaran berbasis *coding* terhadap minat siswa memilih karir di bidang bioinformatika atau bioteknologi.
3. Pengembangan modul pelatihan guru yang adaptif (khususnya untuk guru non-TIK) guna menjembatani kesenjangan kompetensi teknis yang menjadi penghambat utama di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arasteh, B., Pirian, P., & Jahromi, G. P. (2021). Teaching computational thinking in K-12: A systematic review of citations. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37(5), 1334–1353. <https://doi.org/10.1111/jcal.12572>
- Bielik, T., Stephens, A. L., & Lohwasser, K. (2021). Using systems thinking to support students' modeling of ecosystems in a computational environment. *International Journal of Science Education*, 43(15), 2453–2475. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1982054>
- Dabholkar, S., & Wilensky, U. (2022). Determining the direction of causality in complex ecosystems: A study of students' computational modeling. *Journal of Science Education and Technology*, 31(3), 289–305. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-09955-x>
- Grover, S., & Pea, R. (2013). Computational thinking in K-12: A review of the state of the field. *Educational Researcher*, 42(1), 38–43. <https://doi.org/10.3102/0013189X12463051>
- Hmelo-Silver, C. E., Jordan, R., Eberbach, C., & Sinha, S. (2017). Systems learning with a conceptual representation: A quasi-experimental study. *Instructional Science*, 45(1), 53–72. <https://doi.org/10.1007/s11251-016-9392-y>
- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>

- Krell, M., Mathesius, S., Van Vooren, C., & Harms, U. (2023). Assessing modelling competence in biology: A review of current instruments. *Research in Science Education*, 53, 213–235. <https://doi.org/10.1007/s11165-022-10045-8>
- Li, Y., Schoenfeld, A. H., diSessa, A. A., & Graesser, A. C. (2020). On computational thinking. *Journal of Educational Psychology*, 112(6), 1–15. <https://doi.org/10.1037/edu0000458>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(n71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Parrish, J., & Swanson, H. (2022). Integrating computational thinking into K-12 science curriculum: A systematic review. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(4), 543–570. <https://doi.org/10.1002/tea.21740>
- Starkey, L., Shonfeld, M., Eteokleous, N., & Bartscherer, A. (2024). Teachers' digital competence: A global perspective on training and challenges. *Education and Information Technologies*, 29, 1205–1228. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11823-x>
- Swanson, H., Arastoopour Irgens, G., & Wilensky, U. (2024). Scaffolding constructionist modeling in science education: The role of block-based programming. *Interactive Learning Environments*, 32(1), 112–128. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2098776>
- Weintrop, D., Beheshti, E., Horn, M., Orton, K., Jona, K., Trouille, L., & Wilensky, U. (2016). Defining computational thinking for mathematics and science classrooms. *Journal of Science Education and Technology*, 25(1), 127–147. <https://doi.org/10.1007/s10956-015-9581-5>
- Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking like a wolf, a sheep, or a firefly: Learning biology through constructing and testing computational theories. *Cognition and Instruction*, 24(2), 171–209. https://doi.org/10.1207/s1532690xci2402_1
- Wing, J. M. (2006). Computational thinking. *Communications of the ACM*, 49(3), 33–35. <https://doi.org/10.1145/1118178.1118215>
- .