Jurnal Minfo Polgan (JMP)
Volume 15, Nomor 3, September-Desember 2026
DOI : https://doi.org/10.33395/jmp.v15i3.16928
e-ISSN : 2797-3298
p-ISSN : 2089-9424

Analisis Komparatif Algoritma Genetika dan *Constraint Programming* pada Penjadwalan dan Penugasan Guru SMA Negeri 2 Ungaran

[1]Lilis Sugiyanti, [2] Eka Ardhiyanto
[1*,2]Program Studi Magister Teknologi Informasi
Universitas Stikubank (UNISBANK), Semarang, Indonesia
*Korespondensi: lilissugiyanti0028@mhs.unisbank.ac.id

Submit : 19 Sept 2026 | **Diterima** : 25 Okt 2026 | **Terbit** : 28 Okt 2026

ABSTRACT

School timetabling is a mathematically complex (NP-hard) optimization problem, and becomes even harder when subject scheduling and teacher assignment must be solved together, especially when a school requires teachers to meet a minimum teaching-hour policy. This study compares two methods, Genetic Algorithm (GA) and Constraint Programming (CP-SAT), for building subject timetables and assigning teachers at SMA Negeri 2 Ungaran, a public senior high school in Indonesia. The model covers 52 scheduling units (36 regular classes and 16 combined religious-subject groups), 68 teachers, and 47 rooms, with eleven mandatory rules and one rule that is only pursued, including a requirement for teachers to teach at least 24 hours per week. Both methods were tested under two schedule density levels, 46 and 48 teaching hours per week. Performance was measured using seven aspects: the number of schedule clashes, idle time in the middle of the day, the number of teachers meeting the minimum load, the number of teachers not yet meeting it, computation time, a schedule-quality score (fitness), and the success rate. Results show that CP-SAT produced clash-free schedules at both density levels (100% success), whereas GA succeeded fully at the looser density but failed completely at the denser one, even though the two scenarios differed by only two teaching hours per class. This small change shows that GA loses room to maneuver once the schedule is fully packed, while CP-SAT can still solve it systematically. GA also produced less idle time than CP-SAT when it succeeded, but did not guarantee that every teacher met the minimum load, this comparison should be read with caution, since CP-SAT in this study was not programmed to seek the most efficient schedule, only a valid one. These findings help schools choose a scheduling method suited to their schedule density and how strict their constraints are.

Keywords: *comparative analysis, constraint programming, genetic algorithm, school timetabling, teacher assignment*

ABSTRAK

Penjadwalan sekolah adalah persoalan optimasi yang rumit secara matematis (NP-hard), dan menjadi lebih sulit ketika penjadwalan mata pelajaran dan penentuan guru pengampu harus diselesaikan secara bersamaan, terlebih jika sekolah mewajibkan guru memenuhi jam mengajar minimum. Penelitian ini membandingkan dua metode, yaitu Algoritma Genetika (GA) dan *Constraint Programming* (CP-SAT), untuk menyusun jadwal mata pelajaran sekaligus menentukan guru pengampu pada SMA Negeri 2 Ungaran, sebuah sekolah menengah atas negeri di Indonesia. Model mencakup 52 unit penjadwalan (36 kelas reguler dan 16 kelompok mata pelajaran agama), 68 guru, dan 47 ruang, dengan sebelas aturan wajib dan satu aturan yang diupayakan, termasuk kewajiban guru mengajar minimal 24 jam pelajaran per minggu. Kedua metode diuji pada dua tingkat kepadatan jadwal, yaitu 46 dan 48 jam pelajaran per minggu. Kinerja keduanya diukur dari tujuh hal yaitu jumlah bentrok jadwal, jam kosong di tengah hari, jumlah guru yang memenuhi beban minimum, jumlah guru yang belum memenuhinya, waktu komputasi, nilai skor kualitas jadwal (*fitness),* dan tingkat keberhasilan. Hasil menunjukkan CP-SAT berhasil menyusun jadwal tanpa bentrok pada kedua tingkat kepadatan (keberhasilan 100%), sedangkan GA berhasil penuh pada tingkat kepadatan yang lebih longgar tetapi gagal total pada tingkat kepadatan yang lebih padat. Meskipun kedua skenario hanya berbeda dua jam pelajaran per kelas. Perubahan kecil ini menunjukkan bahwa GA kehilangan ruang gerak ketika jadwal terisi penuh, sedangkan CP-SAT tetap mampu menyelesaikannya

@2026 The Author Published By Politeknik Ganesha Medan
This is an open access article under the CC BY licence (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properlycited.

secara sistematis. GA juga menghasilkan jam kosong lebih sedikit dibanding CP-SAT saat berhasil, tetapi tidak menjamin seluruh guru mencapai beban minimum. Perbandingan ini perlu dibaca hati-hati karena CP-SAT pada penelitian ini tidak diprogram untuk mencari jadwal paling efisien, melainkan hanya mencari jadwal yang sah. Temuan ini membantu sekolah memilih metode penjadwalan yang sesuai dengan tingkat kepadatan jadwal dan ketatnya aturan yang berlaku.

Kata Kunci: algoritma genetika, analisis komparatif, constraint programming, penjadwalan sekolah, penugasan guru

PENDAHULUAN

Penjadwalan mata pelajaran merupakan kegiatan administratif rutin yang dihadapi setiap satuan pendidikan pada awal tahun ajaran. Persoalan ini telah lama dikenal sebagai persoalan NP-hard, sehingga ruang pencariannya meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah kelas, guru, dan jumlah mata pelajaran (Tan et al., 2021). (Ceschia et al., 2023) mengidentifikasi enam formulasi standar penjadwalan pendidikan yang seluruhnya tergolong persoalan optimasi yang berbatasan dengan ruang solusi yang sangat besar. Pada jenjang Sekolah Menengah Atas, kerumitan meningkat karena setiap kelas pada jenjang kelas XI dan XII menempuh mata pelajaran pilihan yang berbeda, serta terdapat pengelompokan mata pelajaran agama gabungan lintas kelas. Sekolah yang menjadi studi kasus penelitian ini memiliki 52 unit penjadwalan, 68 guru, dan 47 ruang, dengan total kebutuhan hingga 1.776 jam pelajaran per minggu pada 48 slot waktu. Sekolah juga menetapkan ketentuan tambahan berupa beban mengajar minimum 24 jam pelajaran per minggu bagi guru mata pelajaran, yang berkaitan dengan ketentuan tunjangan profesi guru di Indonesia.

Berbagai penelitian mengusulkan pendekatan komputasi untuk persoalan ini. Algoritma Genetika (GA) banyak diterapkan karena mampu menelusuri ruang pencarian luas dan menangani banyak batasan melalui mekanisme penalti (Rezaeipanah et al., 2021), termasuk pada penjadwalan perkuliahan di Indonesia yang dilaporkan menghasilkan jadwal tanpa bentrok dalam waktu singkat (Mauluddin et al., 2018). (Fachrie & Waluyo, 2021) menunjukkan paralelisasi GA mempercepat komputasi, sedangkan (Nasien & Andi, 2022) membuktikan optimasi parameter GA meningkatkan kualitas jadwal. Di sisi lain, metode eksak menjamin pemenuhan seluruh batasan keras secara pasti apabila solusi layak ditemukan, (Colajanni & Daniele, 2021) misalnya, mengembangkan model pemrograman matematis (mathematical programming) untuk penjadwalan kuliah berbasis kurikulum dengan jaminan serupa, sedangkan Constraint Programming menawarkan mekanisme propagasi batasan (*hard constraint*) yang sebanding untuk kelas persoalan yang sama. (Carlsson et al., 2023) membandingkan langsung metode eksak dan metaheuristik pada penjadwalan ujian riil dan menemukan bahwa keduanya unggul pada kondisi berbeda, sementara (Gu et al., 2025) menegaskan pemilihan metode sangat bergantung pada karakteristik dan skala persoalan.

Penelusuran literatur memperlihatkan tiga celah. Pertama, penelitian penjadwalan pendidikan lebih banyak berfokus pada perguruan tinggi (Chen et al., 2021) dibandingkan sekolah menengah. Kedua, penugasan guru umumnya diperlakukan sebagai data masukan yang telah ditetapkan, bukan bagian dari optimasi, padahal penentuan guru pengampu berkaitan erat dengan pemenuhan beban mengajar minimum (Cutillas et al., 2022). Ketiga, sepengetahuan penulis, perbandingan langsung GA dan Constraint Programming pada data sekolah yang sama dengan variasi tingkat kepadatan jadwal masih jarang dilakukan. Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja GA dan CP-SAT dalam menyelesaikan penjadwalan mata pelajaran dan penugasan guru secara simultan, pada dua tingkat kepadatan jadwal, guna menilai kualitas solusi, waktu komputasi, dan keandalan masing-masing metode.

METODE PENELITIAN

Data dan Pemodelan

Penelitian ini menggunakan data riil dari SMA Negeri 2 Ungaran, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah, Indonesia, data mencakup delapan tabel sebagai masukan yang terdiri dari data guru, kompetensi guru, mata pelajaran, rombongan belajar, ruang, kebutuhan jam pelajaran, struktur waktu, dan daftar batasan. Objek penelitian terdiri atas 36 rombongan belajar reguler dan 16 kelompok mata pelajaran agama gabungan sehingga total berjumlah 52 unit model penjadwalan, 68 guru, dan 47 ruang. Persoalan penjadwalan dalam penelitian ini adalah

penentuan guru pengampu serta hari dan jam pelajaran bagi setiap mata pelajaran di setiap kelas. Penentuan ini harus mengikuti sejumlah aturan wajib yang disebut batasan keras (*hard constraint*) misalnya satu guru tidak boleh mengajar dua kelas pada jam yang sama. Sebuah jadwal dinyatakan layak (*feasible*) apabila tidak melanggar satu pun batasan keras (Abduljabbar & Abdullah, 2022).

Model memiliki sebelas batasan keras yang telah ditentukan meliputi pemenuhan jam pelajaran tepat, larangan bentrok kelompok dan guru, kapasitas laboratorium dan lapangan, batas beban mengajar maksimum 40 JP per minggu, pola blok jam pelajaran, dan beban minimum 24 JP per minggu bagi guru mata pelajaran (dikecualikan guru Bimbingan Konseling). Satu batasan lunak (*soft constraint*) diterapkan, yaitu minimalisasi jam kosong di tengah hari, didefinisikan pada tingkat rombongan belajar (bukan per guru) satu jam kosong dihitung setiap slot yang tidak terisi namun diapit oleh slot terisi pada hari yang sama untuk satu kelompok.

Perlu ditegaskan bahwa batasan beban minimum 24 JP diformulasikan secara berbeda pada kedua metode. Pada *Constraint Programming*, batasan ini dinyatakan sebagai batasan keras eksplisit sehingga wajib terpenuhi agar solusi dinyatakan layak. Pada Algoritma Genetika, batasan yang sama diformulasikan sebagai komponen penalti pada fungsi fitness, bukan sebagai batasan keras, mengikuti praktik umum metaheuristik berbasis penalti (Rezaeipanah et al., 2021). Akibatnya, istilah "keberhasilan" atau "kelayakan" yang dilaporkan untuk kedua metode pada penelitian ini memiliki cakupan yang berbeda. Pada Algoritma *Constraint Programming*, kelayakan mencakup seluruh batasan keras termasuk beban minimum, namun bagi Algoritma Genetika, status "bebas pelanggaran keras" yang dilaporkan hanya mencakup batasan terkait bentrok jadwal, kapasitas, dan pola blok (tidak termasuk beban minimum, yang pemenuhannya dilaporkan terpisah sebagai jumlah guru yang belum mencapai beban minimum). Perbedaan definisi ini merupakan keterbatasan penting penelitian yang diuraikan lebih lanjut pada bagian Keterbatasan Penelitian.

Skenario Pengujian

Penelitian ini membandingkan dua skenario yang berbeda dalam kepadatan jadwal. Kepadatan menunjukkan seberapa penuh jadwal kelas reguler dalam satu minggu, yang memiliki 48 slot jam pelajaran (JP). Pada skenario padat, kurikulum menuntut tepat 48 JP per kelas, sehingga seluruh slot terisi (100%). Pada skenario longgar, kebutuhan diturunkan menjadi 46 JP per kelas, sehingga tersisa dua slot kosong per kelas (95,8% terisi). Istilah longgar bersifat relatif, karena selisihnya hanya dua slot. Penurunan dilakukan dengan mengurangi dua mata pelajaran, Seni Rupa dan Bahasa Jawa, dari 2 JP menjadi 1 JP per minggu. Mata pelajaran lain tidak diubah. Dengan demikian, total kebutuhan seluruh 52 unit penjadwalan turun dari 1.776 JP menjadi 1.704 JP, yaitu selisih 72 JP (2 JP × 36 kelas reguler).

Perubahan ini berdampak pada guru. Aturan beban minimum 24 JP hanya berlaku bagi guru wajib, yaitu guru mata pelajaran yang diperkirakan masih bisa mencapai 24 JP per minggu. Perkiraan itu dihitung dengan membagi kebutuhan jam setiap mata pelajaran secara rata kepada semua guru yang mampu mengajarnya, lalu menjumlahkan hasilnya untuk setiap guru. Guru yang perkiraannya di bawah 24 JP tidak diwajibkan, demikian pula guru Bimbingan Konseling. Karena kebutuhan jam Seni Rupa dan Bahasa Jawa berkurang pada skenario longgar, perkiraan beban sebagian guru ikut turun. Akibatnya, jumlah guru wajib adalah 62 pada skenario padat dan 58 pada skenario longgar. Ringkasnya, skenario padat memiliki 48 JP per kelas, total 1.776 JP, dan 62 guru wajib; skenario longgar memiliki 46 JP per kelas, total 1.704 JP, dan 58 guru wajib. Jadi kedua skenario tidak hanya berbeda dalam kepadatan jadwal, tetapi juga dalam daftar guru yang wajib memenuhi beban minimum. Hal ini perlu diingat saat membaca perbandingan hasil kedua skenario.

Penyelesaian dengan CP-SAT

CP-SAT adalah *solver* dari pustaka OR-Tools yang menelusuri kemungkinan jadwal secara sistematis dan menolak setiap kemungkinan yang melanggar aturan wajib. Setiap penempatan guru pada hari dan jam tertentu dinyatakan sebagai pilihan ya atau tidak (variabel *boolean*), sedangkan beban mengajar setiap guru dihitung sebagai bilangan bulat sehingga batas minimum dan maksimumnya dapat dituliskan langsung. CP-SAT diminta mencari satu jadwal yang memenuhi seluruh batasan keras, tanpa fungsi objektif yang harus diminimalkan.

Tabel 1 Daftar Batasan keras (*hard constraint*)

No	Batasan Keras
1	Setiap mata pelajaran diajarkan tepat sebanyak JP yang ditetapkan kurikulum untuk setiap kelas
2	Setiap mata pelajaran pada tiap kelompok diampu satu guru
3	Satu kelas tidak boleh menerima dua pelajaran pada jam yang sama
4	Satu guru tidak boleh mengajar dua kelas pada jam yang sama
5	Mata pelajaran Informatika yang berlangsung pada jam yang sama tidak boleh melebihi jumlah laboratorium komputer
6	Beban mengajar guru maksimal 40 JP per minggu
7	Satu mata pelajaran maksimal 2 JP per hari per kelompok, kecuali Olahraga
8	Satu guru mengajar maksimal 10 JP per hari
9	Jam pelajaran disusun dalam blok berurutan, misalnya 3 JP menjadi 2+1 dan 4 JP menjadi 2+2. Olahraga 3 JP dilaksanakan dalam satu blok
10	Olahraga wajib dilaksanakan di lapangan
11	Guru mata pelajaran wajib minimal 24 JP dalam satu minggu (kecuali guru Bimbingan Konseling)

Penyelesaian dengan Algoritma Genetika

Metode kedua adalah Algoritma Genetika (GA), yang bekerja dengan meniru seleksi alam. GA mengelola sekumpulan jadwal kandidat (populasi) yang diperbaiki berulang kali dalam putaran yang disebut generasi. Pada setiap generasi, dua jadwal dipilih sebagai induk melalui seleksi tournament, lalu jadwal baru dibentuk dengan persilangan tingkat kelompok, yaitu setiap kelompok kelas mewarisi jadwalnya dari salah satu induk. Blok yang bentrok kemudian digeser dan diperbaiki dengan pencarian lokal (*local search*). Modifikasi operator persilangan pada GA untuk penjadwalan telah dikaji sebelumnya, misalnya dengan fuzzy crossover (Maspiyanti et al., 2025) .

Setiap jadwal kandidat (kromosom) terdiri atas 1.016 gen. Setiap gen merepresentasikan satu blok kegiatan pembelajaran berdurasi 1, 2, atau 3 JP, yang dicatat bersama guru pengampu dan waktu mulainya. Jadi, 1.016 adalah jumlah blok, bukan jumlah JP. Pada skenario 48 JP, kromosom memuat 688 blok 2 JP, 292 blok 1 JP, dan 36 blok 3 JP (Olahraga), sehingga 688 × 2 + 292 × 1 + 36 × 3 = 1.776 JP, yaitu total kebutuhan. Pada skenario 46 JP, dua mata pelajaran yang diturunkan berubah dari blok 2 JP menjadi blok 1 JP sehingga komposisinya menjadi 616, 364, dan 36 blok (616 × 2 + 364 × 1 + 36 × 3 = 1.704 JP), dengan jumlah blok tetap 1.016.

GA berjalan dalam dua fase. Fase 1 bertujuan menghapus seluruh pelanggaran aturan wajib selain beban minimum, dan berhenti lebih awal bila tujuan itu tercapai. Fase 2 hanya dijalankan bila fase 1 berhasil, dan bertujuan mengurangi jam kosong. Batas waktu tiap fase tercantum pada Tabel 2. Pada skenario 48 JP, fase 1 tidak pernah berhasil dalam batas waktunya (160 detik), sehingga fase 2 tidak pernah dijalankan dan setiap pengulangan berhenti karena waktu habis, itulah sebabnya waktu komputasi GA pada skenario ini hampir sama di semua pengulangan (rata-rata 161,9 detik). Pada skenario 46 JP kedua fase berjalan sehingga rata-rata waktunya lebih panjang (184,0 detik). Konfigurasi lengkap GA dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2 Konfigurasi Algoritma Genetika

Parameter	Nilai	Keterangan
Jumlah gen per kromosom	1.016 blok jam pelajaran	Satu jadwal kandidat (kromosom) mencatat guru dan waktu mulai untuk setiap blok jam pelajaran. Pada skenario 48 JP: 688 blok 2 JP, 292 blok 1 JP, dan 36 blok 3 JP (Olahraga).
Ukuran populasi	30	Jumlah jadwal kandidat pada setiap generasi.
Inisialisasi populasi	Acak, lalu diperbaiki	Jadwal acak diperbaiki dengan pencarian lokal (4 putaran) sebelum masuk populasi.

Parameter	Nilai	Keterangan
Model penggantian populasi	Generasional dengan elitisme	Populasi baru terdiri atas 2 jadwal elit dan 28 anak.
Seleksi induk	Tournament, ukuran 3	Tiga jadwal diambil secara acak; yang skor fitness-nya terkecil menjadi induk.
Persilangan	Tingkat kelompok	Setiap kelompok kelas mewarisi seluruh jadwalnya dari salah satu dari dua induk; induk dipilih acak dengan peluang 0,5 untuk tiap kelompok.
Laju persilangan	1,0	Setiap anak dibentuk melalui persilangan dua induk.
Mutasi (operator heuristik terarah)	0,3 (fase 1); 0,2 (fase 2)	Hanya blok yang sedang bentrok kelas atau guru yang dapat dipindahkan secara acak ke posisi lain, masing-masing dengan peluang tersebut. Bukan mutasi per gen seperti definisi baku; bila jadwal sudah bebas bentrok, operator ini tidak mengubah apa pun.
Pencarian lokal	25 posisi per blok; 4 putaran (fase 1), 3 dan 2 putaran (fase 2)	Blok yang bentrok dipindahkan ke posisi dengan konflik paling sedikit di antara 25 posisi acak yang diperiksa. Diterapkan pada seluruh jadwal awal dan seluruh anak, dan hasilnya ditulis kembali ke kromosom (pendekatan Lamarckian).
Penyeimbangan beban	Batas 40 JP	Bila beban seorang guru melebihi 40 JP, sebagian mata pelajaran dialihkan ke guru lain yang mampu.
Elitisme	2 jadwal terbaik	Dibawa ke generasi berikutnya; pada fase 2 hanya diganti bila hasil perbaikannya tidak lebih buruk.
Pemadatan jadwal	Hanya fase 2	Blok dimajukan ke slot kosong yang lebih awal pada hari yang sama untuk mengurangi jam kosong.
Restart	Setelah 10 generasi tanpa perbaikan (fase 1)	Tujuh jadwal dalam populasi diganti jadwal baru hasil inisialisasi.
Bobot pelanggaran aturan wajib	1.000	Per pelanggaran: bentrok kelas, bentrok guru, kapasitas laboratorium komputer atau lapangan, lebih dari 2 JP per hari untuk satu mata pelajaran, lebih dari 10 JP per hari atau 40 JP per minggu untuk satu guru.
Bobot jam kosong	10	Per jam kosong di tengah hari pada jadwal satu kelompok.
Bobot kekurangan beban minimum	5	Per guru wajib yang bebannya antara 1 dan 23 JP.
Batas waktu fase 1	160 detik (skenario 48 JP) [160: skenario 46 JP]	Anggaran waktu maksimum fase 1, yang bertujuan menghapus seluruh pelanggaran aturan wajib.
Batas waktu fase 2	40 detik	Hanya dijalankan bila fase 1 mencapai nol pelanggaran; tujuannya mengurangi jam kosong.
Kriteria berhenti	Nol pelanggaran aturan wajib (fase 1) atau waktu habis	Fase 1 berhenti lebih awal bila tidak ada lagi pelanggaran aturan wajib; fase 2 berhenti saat waktu habis. Jumlah generasi tidak ditetapkan di awal.
Pengulangan	10 per skenario	Satu pengulangan adalah satu kali GA dijalankan dari awal; seed acak = 42 + nomor pengulangan.
Penentuan nilai parameter	Tanpa penyetelan sistematis	Nilai parameter ditetapkan tanpa analisis sensitivitas (lihat Keterbatasan Penelitian butir 6).

Ada tiga hal pada Tabel 2 yang perlu dipahami. Pertama, operator yang disebut mutasi bekerja secara terarah, hanya blok yang sedang bentrok yang dapat dipindahkan, sehingga operator ini lebih menyerupai perbaikan heuristik daripada mutasi baku yang dapat mengubah gen mana pun. Kedua, pencarian lokal dijalankan pada seluruh jadwal awal dan seluruh anak, dan hasilnya langsung ditulis kembali ke jadwal tersebut. GA yang dilengkapi pencarian lokal seperti ini disebut algoritma memetika (memetic algorithm). Ketiga, nilai parameter ditetapkan tanpa penyetelan sistematis dan GA dihentikan oleh batas waktu, bukan oleh jumlah generasi tertentu, kedua hal ini dibahas pada bagian Keterbatasan Penelitian.

Fungsi *Fitness*

Mutu jadwal dinilai dengan skor *fitness*, yaitu jumlah berbobot tiga komponen penalti seperti pada Persamaan (1).

$$F = 1{,}000 \times HV + 10 \times IH + 5 \times MWV \quad (1)$$

HV adalah jumlah kelebihan pelanggaran aturan wajib selain beban minimum, yaitu bentrok kelas, bentrok guru, kelebihan kapasitas laboratorium komputer dan lapangan, kelebihan di atas 2 JP per hari untuk satu mata pelajaran dalam satu kelompok (kecuali Olahraga), serta kelebihan di atas 10 JP per hari dan 40 JP per minggu untuk satu guru. Karena yang dihitung adalah kelebihannya, seorang guru dengan beban 43 JP menyumbang 3 pelanggaran. *IH* adalah jumlah jam kosong di tengah hari. *MWV* adalah jumlah guru wajib dengan beban antara 1 dan 23 JP, komponen inilah yang menjadikan beban minimum sebagai penalti pada GA, bukan aturan wajib seperti pada CP-SAT. Semakin kecil nilai F, semakin baik jadwalnya. Sebagai contoh, GA pada skenario 46 JP memperoleh rata-rata *IH* = 30,5 dan *MWV* = 13,6 sehingga *F* = 10 × 30,5 + 5 × 13,6 = 373,0. Pada CP-SAT, F dihitung dari jadwal akhir dan tidak dioptimalkan oleh solver, *HV* dihitung dari bentrok kelas dan guru karena batasan lainnya sudah terpenuhi oleh model.

Pengukuran Kinerja

Kinerja kedua metode diukur dengan tujuh ukuran yang mengacu pada praktik pelaporan benchmark penjadwalan pendidikan (Ceschia et al., 2023) jumlah pelanggaran batasan keras, jumlah jam kosong di tengah hari, jumlah guru yang mencapai beban minimum, jumlah guru yang belum mencapainya, waktu komputasi, nilai fitness (Persamaan 1), dan tingkat keberhasilan. Tingkat keberhasilan adalah persentase pengulangan yang menghasilkan jadwal bebas pelanggaran batasan keras. Bagi GA, batasan keras di sini tidak mencakup beban minimum, sehingga keberhasilan GA berarti jadwal bebas bentrok dan pelanggaran kapasitas. Tingkat keberhasilan CP-SAT adalah hasil satu kali jalankan (1/1) dan tidak setara secara statistik dengan tingkat keberhasilan GA yang berasal dari sepuluh pengulangan. Konsistensi hasil GA antar pengulangan dinilai dari sebaran nilai pada sepuluh pengulangan (rincian skenario 48 JP pada Tabel 5), mengikuti pendekatan (Rezaeipanah et al., 2021).

Sebagai ukuran tambahan, dihitung selisih relatif fitness GA terhadap CP-SAT pada skenario yang sama, seperti pada Persamaan (2).

$$\Delta F = \frac{F_{\mathrm{GA}} - F_{\mathrm{CP}}}{F_{\mathrm{CP}}} \times 100\% \quad (2)$$

FGA adalah rata-rata *fitness* GA pada sepuluh pengulangan dan *FCP* adalah *fitness* CP-SAT. Nilai negatif berarti GA memperoleh *fitness* lebih kecil (lebih baik). Ukuran ini hanya membandingkan dua jadwal secara relatif dan bukan bukti optimalitas, karena CP-SAT pada penelitian ini tidak diminta meminimalkan *fitness* sehingga *FCP* bukan nilai optimum.

Pelaksanaan Eksperimen

CP-SAT dijalankan satu kali pada setiap skenario dengan delapan utas paralel dan nilai *random seed* tetap. Satu kali jalankan semula dianggap memadai karena CP-SAT diperlakukan sebagai solver deterministik, tetapi pencarian paralel tidak menjamin hasil identik pada setiap penjalanan, sehingga keandalan CP-SAT antar-pengulangan tidak dapat dinilai, dan hal ini dicatat sebagai keterbatasan. GA bersifat acak sehingga dijalankan sepuluh kali pada setiap skenario dengan *seed* yang berbeda seperti konfigurasi parameter pada Tabel 2. Seluruh eksperimen dijalankan dengan Python pada lingkungan kerja berbasis Google Colaboratory CP-SAT memakai pustaka OR-Tools, sedangkan GA diimplementasikan sendiri menggunakan Python tanpa pustaka GA.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Kinerja Kedua Metode

Hasil eksperimen pada empat kombinasi metode dan skenario disajikan pada Tabel 3. Tabel ini terdiri atas tiga kelompok ukuran, yaitu kelayakan jadwal, kualitas jadwal, dan kinerja komputasi. Kolom CP-SAT berisi hasil satu kali jalankan, sedangkan kolom GA berisi rata-rata sepuluh pengulangan dengan nilai terkecil dan terbesar dalam kurung.

Tabel 3 Perbandingan kinerja CP-SAT dan Algoritma Genetika

Ukuran	Skenario 46 JP		Skenario 48 JP	
	CP-SAT (1 kali jalankan)	GA (rata-rata 10 pengulangan)	CP-SAT (1 kali jalankan)	GA (rata-rata 10 pengulangan)
A. Kelayakan jadwal				
Pelanggaran aturan wajib (jumlah)	0	0 (semua pengulangan)	0	130,7 (100-174)
Tingkat keberhasilan (pengulangan tanpa pelanggaran aturan wajib)	1 dari 1 (100%)	10 dari 10 (100%)	1 dari 1 (100%)	0 dari 10 (0%)
B. Kualitas jadwal				
Jam kosong di tengah hari (jam)	55	30,5 (24-33)	0	65,9 (52-80)
Guru wajib yang mencapai beban 24 JP (orang)	58 dari 58	44,4 dari 58 (42-49)	62 dari 62	48,2 dari 62 (44-53)
Guru wajib yang belum mencapai 24 JP (orang)	0	13,6 (9-16)	0	13,8 (9-18)
Skor fitness (makin kecil makin baik)	550	373,0 (315-410)	0	131.428,0 (100.575-174.890)
C. Kinerja komputasi				
Waktu komputasi (detik)	277,1	184,0 (168,3-201,7)	515,7	161,9 (160,0-163,3)

Pada Tabel 3 Kolom CP-SAT berisi hasil satu kali jalankan. Kolom GA berisi rata-rata sepuluh pengulangan, angka dalam kurung adalah nilai terkecil-terbesar. Pelanggaran aturan wajib tidak mencakup beban minimum guru. Jumlah guru wajib adalah 58 pada skenario 46 JP dan 62 pada skenario 48 JP, angka GA dihitung dari jumlah guru wajib dikurangi guru yang belum mencapai 24 JP. Skor *fitness* GA pada skenario 48 JP didominasi penalti pelanggaran aturan wajib (1.000 poin per pelanggaran) karena jadwalnya tidak layak.

Dari sisi kelayakan, CP-SAT menghasilkan jadwal tanpa pelanggaran aturan wajib (batasan keras) pada kedua skenario. Status OPTIMAL pada CP-SAT di sini hanya berarti solver berhasil menemukan jadwal yang memenuhi seluruh batasan keras, status ini bukan bukti bahwa jadwalnya terbaik, karena CP-SAT tidak diminta meminimalkan apa pun. GA menghasilkan jadwal tanpa pelanggaran aturan wajib pada kesepuluh pengulangan di skenario 46 JP (10 dari 10). Pada skenario 48 JP, tidak satu pun dari sepuluh pengulangan berhasil rata-rata masih 130,7 pelanggaran, dan pengulangan terbaik pun masih 100 pelanggaran. Bagi GA, pelanggaran aturan wajib tidak mencakup beban minimum guru. Dari sisi kualitas pada skenario 46 JP, GA menghasilkan jam kosong yang lebih sedikit daripada CP-SAT (rata-rata 30,5 dibanding 55). Namun GA rata-rata menyisakan 13,6 dari 58 guru wajib yang belum mencapai 24 JP, sedangkan CP-SAT memenuhinya untuk seluruh guru wajib. Pola ini sejalan dengan rancangan *fitness* GA, yang memperlakukan beban minimum sebagai penalti dengan bobot (5) lebih kecil daripada bobot jam kosong (10). Skor *fitness* GA yang lebih kecil (373,0 dibanding 550) dibahas pada bagian Selisih Relatif *Fitness*. Pada skenario 48 JP, jam kosong CP-SAT bernilai 0 karena seluruh slot kelas terisi sesuai kebutuhan kurikulum, sedangkan jam kosong dan skor *fitness* GA tidak menggambarkan jadwal yang dapat dipakai karena jadwal dinilai tidak layak.

Dari sisi komputasi, CP-SAT membutuhkan 277,1 detik pada skenario 46 JP dan 515,7 detik pada skenario 48 JP untuk satu kali jalankan, sedangkan GA membutuhkan rata-rata 184,0 dan 161,9 detik. Waktu GA pada skenario 48 JP hampir sama di semua pengulangan (160,0-163,3 detik) karena setiap pengulangan berhenti saat batas waktu fase 1 habis, bukan karena GA telah mencapai hasil terbaiknya. Perbandingan waktu ini belum setara karena CP-SAT memakai delapan utas paralel sedangkan GA berjalan pada satu utas (Keterbatasan Penelitian butir 4). Perbedaan keberhasilan GA antar-skenario dibahas pada bagian berikut.

Fenomena Transisi Kelayakan

Temuan utama penelitian ini adalah transisi kelayakan pada GA, yaitu perubahan mendadak dari selalu berhasil menjadi selalu gagal. Pada skenario 46 JP, GA berhasil pada 10 dari 10 pengulangan sedangkan pada skenario 48 JP, GA gagal pada 10 dari 10 pengulangan. Padahal kedua skenario hanya berbeda dua jam pelajaran per kelas. CP-SAT tetap berhasil pada kedua skenario. Di sini, berhasil berarti jadwal bebas pelanggaran aturan wajib selain beban minimum, sebagaimana didefinisikan pada bagian Metode.

Perbedaan kedua skenario terletak pada ruang yang tersisa di dalam jadwal. Pada skenario 48 JP, setiap kelas reguler sudah memakai seluruh 48 slot per minggu (utilisasi 100%), sehingga tidak ada slot kosong untuk menampung pemindahan blok. Pada skenario 46 JP, setiap kelas masih memiliki dua slot kosong (utilisasi 95,8%). Penjelasan yang paling masuk akal adalah bahwa GA kehilangan ruang gerak pada skenario 48 JP, ketika semua slot terisi, memindahkan sebuah blok untuk menghilangkan satu pelanggaran cenderung menimbulkan pelanggaran baru di tempat lain, sehingga jumlah pelanggaran tidak turun lagi. Penjelasan ini masih berupa dugaan, karena belum diuji dengan menghitung jenis pelanggaran yang paling banyak. Dugaan lain yang belum dapat disingkirkan adalah GA belum cukup berkembang dalam waktu yang tersedia, karena hanya mencapai 45-51 generasi per pengulangan (Tabel 5). CP-SAT tidak mengalami kendala ini karena menelusuri kemungkinan jadwal secara sistematis dan langsung menolak setiap kemungkinan yang melanggar aturan wajib.

Selisih Relatif *Fitness*

Untuk membandingkan kualitas jadwal kedua metode dengan satu angka, dipakai skor *fitness* (Persamaan 1, semakin kecil semakin baik) dan selisih relatifnya, ΔF (Persamaan 2). Perbandingan ini hanya dapat dilakukan pada skenario 46 JP, karena hanya di skenario itu GA menghasilkan jadwal yang layak.

Pada skenario 46 JP, skor GA adalah 10 × 30,5 + 5 × 13,6 = 373,0, dengan 30,5 adalah rata-rata jam kosong dan 13,6 adalah rata-rata guru wajib yang belum mencapai 24 JP. Skor CP-SAT adalah 10 × 55 + 5 × 0 = 550. Dengan demikian ΔF = (373,0 − 550) / 550 × 100% = −32,2%, artinya skor GA rata-rata 32,2% lebih kecil, yaitu lebih baik. Selisih ini terutama berasal dari jam kosong, GA mengurangi jam kosong sebanyak 24,5 jam dibanding CP-SAT sehingga skornya turun 245 poin, tetapi GA menambah 68 poin karena 13,6 guru wajib belum mencapai 24 JP. Selisih bersihnya 177 poin. Angka ini tidak berarti bahwa GA lebih baik secara umum. CP-SAT tidak diminta meminimalkan skor *fitness* melainkan hanya mencari jadwal yang memenuhi seluruh batasan keras, sehingga skornya bukan nilai terkecil yang mungkin. GA sebaliknya memang dirancang meminimalkan skor, dengan bobot jam kosong (10) lebih besar daripada bobot beban minimum (5). Karena itu ΔF hanya menunjukkan perbandingan dua jadwal, bukan jarak terhadap jadwal optimal. Pada skenario 48 JP, ΔF tidak dapat dihitung karena GA tidak menghasilkan jadwal layak dan skor CP-SAT bernilai 0, sehingga pembagian oleh nol tidak terdefinisi.

Analisis Beban Mengajar Guru

Ketentuan beban mengajar minimum 24 JP menjadi pembeda penting antara kedua metode. Tabel 4 menunjukkan berapa guru wajib yang mencapai beban tersebut pada keempat kombinasi metode dan skenario.

Tabel 4 Pemenuhan beban mengajar minimum 24 JP oleh guru wajib

Metode	Guru wajib (orang)	Guru wajib yang mencapai beban 24 JP, jumlah (persentase)
Skenario 46 JP		
CP-SAT (1 kali jalankan)	58	58 (100%)

Metode	Guru wajib (orang)	Guru wajib yang mencapai beban 24 JP, jumlah (persentase)
GA (rata-rata 10 pengulangan)	58	44,4 (76,6%)
Skenario 48 JP		
CP-SAT (1 kali jalankan)	62	62 (100%)
GA (rata-rata 10 pengulangan)	62	48,2 (77,7%)a

CP-SAT memenuhi beban minimum bagi seluruh guru wajib pada kedua skenario (58 dari 58 dan 62 dari 62), karena beban minimum dinyatakan sebagai aturan wajib dalam modelnya. GA tidak memberi jaminan serupa pada skenario 46 JP, rata-rata 44 dari 58 guru wajib (76,6%) mencapai 24 JP, sehingga rata-rata 13 guru belum mencapainya meskipun jadwalnya bebas bentrok. Hal ini sejalan dengan perlakuan beban minimum pada GA sebagai penalti, bukan aturan wajib.

Pada skenario 48 JP, rata-rata 48 dari 62 guru wajib (77,7%) mencapai 24 JP pada jadwal GA. Namun angka ini kurang bermakna karena jadwal GA pada skenario tersebut tidak layak (rata-rata masih 130,7 pelanggaran aturan wajib), sehingga pemenuhan beban minimum terjadi pada jadwal yang tidak dapat digunakan.

Rincian Pengulangan Algoritma Genetika pada Skenario Padat

Tabel 5 menyajikan hasil kesepuluh pengulangan GA pada skenario 48 JP. Satu pengulangan adalah satu kali GA dijalankan dari awal dengan bilangan acak yang berbeda. Tabel ini memperlihatkan apakah kegagalan GA terjadi secara konsisten atau hanya kebetulan pada satu kali jalan.

Tabel 5 Hasil sepuluh pengulangan Algoritma Genetika pada skenario 48 JP

Pengulangan	Pelanggaran aturan wajib	Jam kosong di tengah hari (jam)	Guru wajib belum mencapai 24 JP	Generasi yang dijalankan	Waktu (detik)
1	127	65	14	48	162,0
2	116	59	15	47	161,4
3	113	69	11	49	162,8
4	145	73	16	45	160,0
5	124	64	16	50	163,3
6	114	52	15	50	160,6
7	174	80	18	46	163,3
8	100	53	9	51	161,7
9	124	67	11	48	161,9
10	170	77	13	46	162,1
Rata-rata	130,7	65,9	13,8	48,0	161,9
Terkecil	100	52	9	45	160,0
Terbesar	174	80	18	51	163,3

Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa tidak satu pun dari sepuluh pengulangan berhasil. Jumlah pelanggaran aturan wajib berkisar antara 100 dan 174 dengan rata-rata 130,7; pengulangan terbaik (pengulangan 8) pun masih memiliki 100 pelanggaran, jauh dari nol. Jam kosong (rata-rata 65,9) dan guru wajib yang belum mencapai 24 JP (rata-rata 13,8) berbeda-beda antar-pengulangan, tetapi tidak ada pengulangan yang mendekati jadwal layak.

Kegagalan yang berulang pada kesepuluh pengulangan menunjukkan bahwa hasil ini bukan kebetulan dari satu kali jalan yang kurang beruntung. Kesimpulan ini berlaku untuk GA dengan konfigurasi yang diuji (Tabel 2) dan tidak otomatis berlaku untuk semua GA. Waktu yang hampir sama pada semua pengulangan (160,0–163,3 detik) dan jumlah generasi yang hanya 45-51 menunjukkan bahwa GA berhenti karena batas waktu, sehingga belum diketahui apakah GA dengan waktu lebih panjang atau populasi lebih besar akan berhasil.

Contoh Jadwal Hasil

Untuk memberi gambaran yang konkret, Tabel 6 dan Tabel 7 menampilkan jadwal satu kelas (X-01) selama satu minggu, dari Senin sampai Jumat. Tabel 6 adalah hasil CP-SAT pada skenario 48 JP, yaitu skenario padat yang sesuai kebutuhan kurikulum sekolah. Tabel 7 adalah hasil GA pada skenario 46 JP, satu-satunya skenario tempat GA menghasilkan jadwal yang layak. Karena skenarionya berbeda, kedua tabel ini bukan perbandingan langsung antar-metode, perbandingan metode disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Contoh jadwal kelas X-01 hasil CP-SAT pada skenario 48 JP

JP	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jumat
1	Biologi (07.50)	Olahraga (07.00)	Matematika (07.00)	Kimia (07.00)	Pend. Agama (07.00)
2	Fisika (08.30)	Olahraga (07.45)	Matematika (07.45)	Bahasa Jawa (07.45)	Pend. Agama (07.30)
3	Fisika (09.10)	Olahraga (08.30)	Seni Rupa (08.30)	Bahasa Jawa (08.30)	Sosiologi (08.00)
4	Koding & KA (10.05)	Fisika (09.15)	Seni Rupa (09.15)	Bahasa Indonesia (09.15)	Sosiologi (08.30)
5	Koding & KA (10.45)	Sejarah (10.15)	Ekonomi (10.15)	Bahasa Indonesia (10.15)	Bahasa Inggris (09.15)
6	Pend. Agama (11.25)	Ekonomi (11.00)	Ekonomi (11.00)	Bahasa Inggris (11.00)	Bahasa Inggris (09.45)
7	Informatika (12.35)	Kimia (12.30)	Biologi (12.30)	Sosiologi (12.30)	Geografi (10.15)
8	Informatika (13.15)	Kimia (13.15)	Biologi (13.15)	Geografi (13.15)	Geografi (11.15)
9	Sejarah (13.55)	PKN (14.00)	Bahasa Indonesia (14.00)	Matematika (14.00)	-
10	Sejarah (14.35)	PKN (14.45)	Bahasa Indonesia (14.45)	Matematika (14.45)	-
JP terisi	10	10	10	10	8
Jam kosong	0	0	0	0	0

Tabel 7 Contoh jadwal kelas X-01 hasil GA pada skenario 46 JP

JP	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jumat
1	Olahraga (07.50)	Informatika (07.00)	Matematika (07.00)	Sejarah (07.00)	Geografi (07.00)
2	Olahraga (08.30)	Informatika (07.45)	Matematika (07.45)	Sejarah (07.45)	Geografi (07.30)
3	Olahraga (09.10)	Seni Rupa (08.30)	Sosiologi (08.30)	Sosiologi (08.30)	Fisika (08.00)
4	Bahasa Inggris (10.05)	Pend. Agama (09.15)	Sosiologi (09.15)	Kimia (09.15)	Sejarah (08.30)
5	Fisika (10.45)	Matematika (10.15)	Bahasa Inggris (10.15)	Kimia (10.15)	Koding & KA (09.15)
6	Fisika (11.25)	Matematika (11.00)	Bahasa Inggris (11.00)	Ekonomi (11.00)	Koding & KA (09.45)

JP	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jumat
7	Ekonomi (12.35)	PKN (12.30)	Bahasa Jawa (12.30)	Ekonomi (12.30)	Bahasa Indonesia (10.15)
8	Bahasa Indonesia (13.15)	PKN (13.15)	Kimia (13.15)	Geografi (13.15)	Bahasa Indonesia (11.15)
9	Bahasa Indonesia (13.55)	Biologi (14.00)	Biologi (14.00)	Pend. Agama (14.00)	-
10	-	Biologi (14.45)	-	Pend. Agama (14.45)	-
JP terisi	9	10	9	10	8
Jam kosong	0	0	0	0	0

Kedua jadwal memenuhi kebutuhan kurikulum kelas X-01, setiap pelajaran mendapat jumlah jam yang diminta (misalnya Matematika 4 JP dan Olahraga 3 JP), dan pelajaran yang memakai lebih dari satu jam dalam sehari ditempatkan berurutan. Total jamnya berbeda karena skenarionya berbeda, yaitu 48 JP pada Tabel 6 dan 46 JP pada Tabel 7, sebab Seni Rupa dan Bahasa Jawa masing-masing 2 JP pada skenario 48 JP tetapi 1 JP pada skenario 46 JP. Kelas X-01 tidak memiliki jam kosong di tengah hari pada kedua jadwal, tetapi alasannya berbeda. Pada jadwal CP-SAT, seluruh 48 slot kelas terisi sehingga jam kosong tidak mungkin ada, hal ini berlaku untuk seluruh 52 kelompok (total jam kosong 0). Pada jadwal GA, ketiadaan jam kosong di kelas X-01 merupakan hasil upaya GA meminimalkannya, dan tidak berlaku untuk semua kelas, X-01 termasuk 16 dari 36 kelas reguler yang bebas jam kosong, sedangkan 20 kelas lainnya masih memilikinya (total 24 jam kosong pada jadwal GA ini, rata-rata 30,5 pada sepuluh pengulangan, seperti pada Tabel 3). Kelas X-01 pulang lebih awal pada hari Senin dan Rabu karena JP 10 tidak terisi. Kedua tabel hanya memperlihatkan sisi kelas. Sisi guru tidak terlihat, pada jadwal CP-SAT seluruh 62 guru wajib mencapai beban 24 JP, sedangkan pada jadwal GA yang ditampilkan 15 dari 58 guru wajib belum mencapainya (rata-rata 13,6 guru pada sepuluh pengulangan). Karena skenarionya berbeda, kedua jadwal ini tidak dimaksudkan untuk menyimpulkan metode mana yang lebih baik, kesimpulan itu didasarkan pada Tabel 6.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu melaporkan bahwa GA bekerja baik untuk penjadwalan. (Rezaeipanah et al., 2021) dan (Mauluddin et al., 2018) melaporkan kinerja GA yang baik pada penjadwalan perkuliahan, dan memperoleh jadwal tanpa bentrok pada studi kasusnya. Penelitian ini menunjukkan sisi lain, pada jadwal yang slotnya terisi penuh (skenario 48 JP), GA dengan konfigurasi yang diuji tidak berhasil. Hasil ini tidak membantah penelitian tersebut, karena belum diketahui apakah kasus mereka memiliki slot sisa, dan GA dengan operator perbaikan yang menjamin kelayakan belum diuji pada penelitian ini.

(Carlsson et al., 2023) membandingkan metode eksak dan metaheuristik pada penjadwalan ujian dan melaporkan bahwa keduanya dapat unggul pada kondisi yang berbeda. Hasil penelitian ini sejalan, CP-SAT unggul dalam menjamin kelayakan pada kedua skenario, sedangkan GA menghasilkan jam kosong lebih sedikit pada skenario 46 JP (Tabel 3). Penelitian ini juga memberi petunjuk bahwa batas antara kedua kondisi itu berada di antara kepadatan 46 dan 48 JP pada data yang diuji. Karena hanya dua titik kepadatan yang diuji, batas ini belum dapat ditentukan lebih tepat.

Penelitian ini juga berbeda dari penelitian GA untuk penjadwalan sekolah lain, misalnya (Adimas Ambang Syahputra et al., 2024) pada sekolah dasar, yang menurut abstraknya berfokus pada penghindaran bentrok jadwal. Di sini, penentuan guru pengampu dan beban mengajar minimum 24 JP ikut dioptimalkan, mengikuti gagasan memasukkan penugasan guru ke dalam optimasi (Cutillas et al., 2022), GA yang diuji tidak menjamin beban minimum itu

terpenuhi. Apakah batasan ini yang membuat persoalan lebih sulit bagi GA belum diuji secara terpisah, dan menjadi bahan penelitian lanjutan.

Implikasi Praktis

Pemilihan metode sebaiknya mengikuti kebutuhan sekolah. Untuk sekolah yang mewajibkan beban mengajar minimum, seperti pada penelitian ini, CP-SAT lebih tepat karena menjamin seluruh aturan wajib terpenuhi, termasuk pada jadwal yang slotnya terisi penuh.

GA dengan konfigurasi yang diuji belum dapat dipakai langsung sebagai pengganti CP-SAT. Pada skenario 48 JP, GA tidak menghasilkan jadwal yang layak, dan pada skenario 46 JP rata-rata 13,6 guru wajib belum mencapai 24 JP. GA baru layak dipertimbangkan bila jadwalnya tidak terlalu padat, sekolah dapat menerima beban guru yang tidak sepenuhnya terpenuhi, dan hasilnya diperiksa lebih dahulu. Penambahan mekanisme lain, misalnya perbaikan sesudah jadwal jadi atau bobot penalti beban yang lebih besar, mungkin membantu, tetapi belum diuji.

Dari literatur yang ditelaah, penugasan guru dan pengaruh kepadatan jadwal belum banyak dibahas bersama (Abdipoor et al., 2023; Adimas Ambang Syahputra et al., 2024). Penelitian ini mengisi sebagian celah itu dengan menunjukkan, pada satu sekolah, bahwa kepadatan jadwal dan kewajiban beban guru dapat menentukan metode mana yang berhasil.

Keterbatasan Penelitian

Hasil penelitian ini perlu dibaca dengan memperhatikan lima keterbatasan berikut:

1. Definisi kelayakan kedua metode tidak sepenuhnya sama. Pada CP-SAT, beban mengajar minimum 24 JP adalah aturan wajib, sedangkan pada GA beban minimum hanya penalti. Karena itu keberhasilan 100% GA pada skenario 46 JP berarti jadwalnya bebas bentrok, bukan berarti semua guru wajib mencapai 24 JP, rata-rata 13,6 guru wajib belum mencapainya. Ini keterbatasan yang paling penting, sebab perbandingan kedua metode menjadi tidak sepenuhnya setara.
2. CP-SAT tidak diminta meminimalkan apapun melainkan hanya mencari jadwal yang memenuhi seluruh batasan keras. Akibatnya, selisih relatif *fitness* (ΔF) hanya membandingkan dua jadwal dan tidak menunjukkan seberapa jauh jadwal itu dari jadwal terbaik yang mungkin.
3. Hasil GA hanya berlaku untuk satu konfigurasi (populasi 30, bobot penalti 1.000/10/5, nilai parameter tanpa penyetelan sistematis) dan untuk batas waktu yang diberikan. GA berhenti karena waktu habis, dengan hanya 45-51 generasi pada skenario 48 JP. Belum diketahui apakah populasi yang lebih besar, waktu yang lebih lama, atau operator perbaikan yang menjamin kelayakan akan mengubah hasil, sehingga kegagalan GA pada skenario 48 JP tidak boleh dianggap berlaku untuk semua GA.
4. Perbandingan waktu dan keandalan belum setara. CP-SAT memakai delapan utas paralel, sedangkan GA berjalan pada satu utas, sehingga perbandingan waktu komputasi belum adil. CP-SAT juga hanya dijalankan satu kali per skenario, sedangkan GA sepuluh kali, sehingga keandalan CP-SAT antar-pengulangan tidak dapat dinilai.
5. Cakupan data dan pengujian statistik terbatas. Pengujian hanya memakai dua tingkat kepadatan (46 dan 48 JP) pada satu sekolah, sehingga batas antara kondisi GA berhasil dan gagal baru berupa petunjuk, dan temuan belum tentu berlaku di sekolah lain. Uji statistik formal juga belum dilakukan. Dengan hanya sepuluh pengulangan, hasil 0 dari 10 belum membuktikan bahwa GA pasti gagal pada skenario 48 JP, tingkat keberhasilan sebenarnya masih mungkin setinggi sekitar 31% (batas atas selang kepercayaan 95%).

KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan Algoritma Genetika (GA) dan Constraint Programming (CP-SAT) untuk menyusun jadwal pelajaran sekaligus menentukan guru pengampu di SMA Negeri 2 Ungaran, pada dua tingkat kepadatan jadwal (46 dan 48 JP per kelas). CP-SAT berhasil menyusun jadwal yang memenuhi semua aturan wajib pada kedua skenario, termasuk beban mengajar minimum bagi guru wajib. GA berhasil menyusun jadwal bebas bentrok pada skenario 46 JP (10 dari 10 pengulangan), tetapi gagal pada skenario 48 JP (0 dari 10 pengulangan), padahal kedua skenario hanya berbeda dua jam pelajaran per kelas. Keunggulan GA perlu dibaca dengan hati-hati. Pada skenario 46 JP, GA menghasilkan jam kosong lebih sedikit daripada CP-SAT (rata-rata 30,5 dibanding 55), tetapi rata-rata 13,6 guru wajib belum mencapai beban minimum 24 JP. Selain itu, kegagalan GA pada skenario 48 JP hanya berlaku untuk konfigurasi GA yang diuji dan belum tentu berlaku untuk semua GA. Bagi sekolah yang

mewajibkan beban mengajar minimum dan memiliki jadwal padat, CP-SAT lebih tepat dipakai. Penelitian lanjutan disarankan untuk menyamakan perlakuan beban minimum pada kedua metode, memperkuat GA (populasi lebih besar, waktu lebih lama, operator perbaikan), mencoba pendekatan gabungan CP-SAT dan GA, serta menguji lebih banyak tingkat kepadatan jadwal untuk menentukan batas keberhasilan GA dengan lebih tepat.

REFERENSI

Abdipoor, S., Yaakob, R., Goh, S. L., & Abdullah, S. (2023). Meta-heuristic approaches for the University Course Timetabling Problem. In *Intelligent Systems with Applications* (Vol. 19). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200253

Abduljabbar, I. A., & Abdullah, S. M. (2022). An evolutionary algorithm for solving academic courses timetable scheduling problem. *Baghdad Science Journal*, *19*(2), 399–408. https://doi.org/10.21123/BSJ.2022.19.2.0399

Adimas Ambang Syahputra, Ismail Abdurrozzaq Zulkarnain, & Andy Triyanto Pujo Raharjo. (2024). Penerapan Algoritma Genetika Dalam Sistem Penjadwalan Mata Pelajaran Di SD Islam Terpadu Darussalam. *Jurnal Teknik Informatika Dan Sistem Informasi*, *11*(4), 11–24. https://doi.org/https://doi.org/10.35957/jatisi.v11i4.8891

Carlsson, M., Ceschia, S., Di Gaspero, L., Mikkelsen, R. Ø., Schaerf, A., & Stidsen, T. J. R. (2023). Exact and metaheuristic methods for a real-world examination timetabling problem. *Journal of Scheduling*, *26*(4), 353–367. https://doi.org/10.1007/s10951-023-00778-6

Ceschia, S., Di Gaspero, L., & Schaerf, A. (2023). Educational timetabling: Problems, benchmarks, and state-of-the-art results. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 308, Number 1, pp. 1–18). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.011

Chen, M. C., Sze, S. N., Goh, S. L., Sabar, N. R., & Kendall, G. (2021). A Survey of University Course Timetabling Problem: Perspectives, Trends and Opportunities. *IEEE Access*, *9*, 106515–106529. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100613

Colajanni, G., & Daniele, P. (2021). A new model for curriculum-based university course timetabling. *Optimization Letters*, *15*(5), 1601–1616. https://doi.org/10.1007/s11590-020-01588-x

Cutillas, P. S., Pérez-Perales, D., & Díaz, M. M. E. A. (2022). A mathematical programming tool for an efficient decision-making on teaching assignment under non-regular time schedules. *Operational Research*, *22*(3), 2899–2942. https://doi.org/10.1007/s12351-021-00638-1

Fachrie, M., & Waluyo, A. F. (2021). Model Paralelisasi Algoritma Genetika Terpandu pada Sistem Penjadwalan Kuliah Universitas dengan Alokasi Waktu Dinamis. *Jurnal RESTI*, *5*(3), 550–556. https://doi.org/10.29207/resti.v5i3.2988

Gu, X., Krish, M., Sohail, S., Thakur, S., Sabrina, F., & Fan, Z. (2025). From Integer Programming to Machine Learning: A Technical Review on Solving University Timetabling Problems. In *Computation* (Vol. 13, Number 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/computation13010010

Maspiyanti, F., Gatc, J., Nursari, C. R. S., & Murtako, A. (2025). Course Timetabling using Genetic Algorithm and Fuzzy Cross-Over. *International Journal On Informatics Visualization*, 2133–2141. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.62527/joiv.9.5.3196

Mauluddin, S., Ikbal, I., & Nursikuwagus, A. (2018). Optimasi Aplikasi Penjadwalan Kuliah Menggunakan Algoritma Genetik. *Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi*, *2*(3), 792–799. https://doi.org/https://doi.org/10.29207/resti.v2i3.597

Nasien, D., & Andi, A. (2022). Optimization of Genetic Algorithm in Courses Scheduling. *IT Journal Research and Development*, 151–161. https://doi.org/10.25299/itjrd.2022.7896

Rezaeipanah, A., Matoori, S. S., & Ahmadi, G. (2021). A hybrid algorithm for the university course timetabling problem using the improved parallel genetic algorithm and local search. *Applied Intelligence*, *51*(1), 467–492. https://doi.org/10.1007/s10489-020-01833-x

Tan, J. S., Goh, S. L., Kendall, G., & Sabar, N. R. (2021). A survey of the state-of-the-art of optimisation methodologies in school timetabling problems. *Expert Systems with Applications*, *165*. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113943