



Restorasi Penjadwalan Sumur Minyak Yang Mengalami Off-Time Menggunakan Algoritma Backtracking Dalam Upaya Optimasi Produksi

Angel Caroline Billan*, Tata Sutabri

Program Pasca Sarjana, Teknik Informatika, Universitas Bina Darma, Palembang, Indonesia

Email: ^{1,*}angelcrlnee@gmail.com, ²tata.sutabri@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: angelcrlnee@gmail.com

Abstrak—Penjadwalan restart sumur yang tidak efisien seringkali disebabkan oleh keterbatasan metode konvensional dalam menangani operasional dan kompleksitas lapangan. Penelitian ini mengusulkan solusi berupa penerapan algoritma backtracking dalam menyusun jadwal restart sumur minyak yang mengalami off-time. Algoritma ini dipilih karena kemampuannya dalam mengeksplorasi solusi secara sistematis melalui mekanisme depth-first search dan forward checking untuk memenuhi berbagai kendala operasional seperti ketersediaan kru, kondisi geologi, dan keterkaitan antar sumur. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan model penjadwalan berbasis Constraint Satisfaction Problem (CSP) yang mampu meminimalkan waktu off-time dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pendekatan integratif antara model CSP dan algoritma backtracking yang belum banyak diterapkan dalam konteks operasional migas. Hasil sementara dari simulasi pada data historis menunjukkan bahwa metode ini mampu menurunkan rata-rata waktu off-time sebesar 25%, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya hingga 28,6%, serta mempercepat proses penjadwalan sebesar 66,7% dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi operasional dan mendukung digitalisasi penjadwalan di industri perminyakan.

Kata Kunci: Algoritma Backtracking; Sumur Minyak; Produksi; Constraint Satisfaction Problem (CSP); Operasional

Abstract—Inefficient well restart scheduling is often caused by the limitations of conventional methods in handling operational and field complexity. This study proposes a solution in the form of implementing a backtracking algorithm in compiling an oil well restart schedule that is experiencing off-time. This algorithm is chosen because of its ability to systematically explore solutions through depth-first search and forward checking mechanisms to meet various operational constraints such as crew availability, geological conditions, and interconnectedness between wells. The purpose of this study is to develop a Constraint Satisfaction Problem (CSP)-based scheduling model that is able to minimize off-time and optimize resource utilization. The main contribution of this study is the integrative approach between the CSP model and the backtracking algorithm which has not been widely applied in the context of oil and gas operations. The interim results of simulations on historical data show that this method is able to reduce the average off-time by 25%, increase resource utilization efficiency by 28.6%, and accelerate the scheduling process by 66.7% compared to conventional methods. This approach shows significant potential in improving operational efficiency and supporting the digitalization of scheduling in the oil industry.

Keywords: Backtracking Algorithm; Oil Well; Production; Constraint Satisfaction Problem (CSP); Operation

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas merupakan salah satu sektor vital bagi perekonomian global. Proses ekstraksi minyak seringkali dihadapkan pada tantangan operasional, termasuk waktu henti (off-time) yang dapat mengakibatkan kerugian signifikan. Waktu henti ini dapat disebabkan oleh faktor seperti kerusakan alat, pemeliharaan yang tidak dijadwalkan, atau dari faktor lingkungan. Oleh karena itu penjadwalan yang efisien untuk restart sumur minyak menjadi krusial untuk meminimalkan dampak negatif dari waktu berhenti.

Restorasi penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami off-time ini menjadi isu krusial dalam optimasi produksi migas melihat potensi kerugian ekonomi mencapai \$1,2 juta per sumur dalam satu bulannya [1]. Data lapangan menunjukkan 35% downtime di Blok Rokan disebabkan oleh penumpukan scale dan korosi mikrobiologis (MIC) saat proses restart [2]. Inisiatif digital seperti e-MARS berhasil mereaktivasi 700 sumur non-produktif, namun pendekatan manual masih mengakibatkan konflik alokasi kru dan pelanggaran batasan reservoir pada 22% kasus. Selain itu juga metode manual/konvensional seperti *Critical Path Method (CPM)* dan *Program Evaluation Review Technique (PERT)* terbukti memiliki keterbatasan struktural dalam menangani gangguan dinamis karena ketergantungan pada parameter statis dan ketidakmampuan mengeksplorasi opsi penjadwalan alternatif secara sistematis.

Analisis yang dilakukan menyatakan ada kelemahan struktural dari pendekatan yang ada seperti Metode existing hanya mengevaluasi jalur ke depan tanpa mekanisme *backtracking* untuk merevisi keputusan sebelumnya. Optimasi dilakukan secara sekuensial (biaya → waktu atau sebaliknya) alih-alih terintegrasi, dan Mayoritas algoritma memerlukan data pasti tentang durasi *off-time*, yang seringkali tidak tersedia dalam operasi nyata [3].

Dinamika tekanan reservoir dan ketergantungan operasi antar sumur meningkatkan kompleksitas masalah. Studi lapangan PAD menunjukkan bahwa tidak mematuhi persyaratan precedence dalam penjadwalan manual menyebabkan 40% waktu terbuang. Akibat pertumbuhan eksponensial ruang pencarian ($O(n^k)$) [4]. Masalah ini memerlukan formulasi matematis yang memadukan batasan sumber daya ($\sum r_i(t) \leq R_{max}$) dan temporal ($t_j \geq t_i + \Delta t$) secara terintegrasi.

Restorasi penjadwalan ini juga sering kali tidak dapat mengakomodasi perubahan mendadak dalam situasi lapangan. Sehingga memerlukan pendekatan baru yang lebih adaptif dan efisien. Dalam masalah ini algoritma backtracking, yang terkenal dalam pemecahan masalah kombinatorial, menawarkan solusi yang fleksibel untuk mengatasi kompleksitas dalam penjadwalan restart sumur minyak. Dengan menggunakan algoritma ini, diharapkan dapat ditemukan



solusi optimal yang mempertimbangkan berbagai kendala operasional serta waktu yang dibutuhkan untuk melakukan restart.

Selain itu perkembangan terakhir terkait penelitian ini dijelaskan oleh penelitian Eigar Lamgok Tardok tahun 2018 namun metode ini tidak menyelesaikan masalah penjadwalan ulang saat terjadi off-time [5]. Terdapat juga dalam penelitian Pramanda yang menerapkan PERT dan *resource leveling* pada proyek persiapan sumur eksplorasi, tetapi masih mengalami keterlambatan akibat ketidakmampuan model dalam mengakomodasi variasi ukuran lahan [6]. Berdasarkan buku yang ditulis oleh Ervianto yang menyatakan bahwa mengeksplorasi CPM untuk optimasi sumber daya konstruksi, tetapi terbatas pada skenario linier tanpa mekanisme *backtracking* [7]. Selanjutnya ada menurut Husen yang mengatakan bahwa menganalisis jalur kritis dengan CPM, namun tidak memasukkan algoritma rekursif untuk mengevaluasi opsi penjadwalan alternatif dan menurut Dipohusodo yang mengkaji manajemen proyek konvensional dengan fokus pada penjadwalan awal, tanpa strategi pemulihan jadwal saat terjadi deviasi [8], [9].

Pada penelitian sebelumnya hanya terbatas pada optimasi sumber daya dan penjadwalan awal, tanpa menyediakan mekanisme sistematis untuk menelusuri kemungkinan penjadwalan ulang secara *backtracking* setelah off-time, mengevaluasi kombinasi durasi kegiatan dan alokasi sumber daya paralel, mengintegrasikan batasan biaya dan waktu secara dinamis dalam proses pemulihan jadwal. Selain itu ada penelitian yang mengatakan bahwa dalam penelitiannya dia berhasil mengurangi *downtime* hingga 49 jam melalui sistem pembelajaran mandiri, namun memerlukan infrastruktur komputasi tinggi dan waktu pelatihan panjang [10]. Jadi dalam penelitian ini peneliti mengusulkan implementasi algoritma *backtracking* untuk merestorasi jadwal sumur minyak yang mengalami off-time.

Algoritma *backtracking* adalah suatu teknik pemecahan masalah yang bekerja dengan membangun solusi secara bertahap dan, jika pada suatu langkah solusi yang dibangun tidak memungkinkan untuk mencapai solusi akhir yang valid, algoritma ini akan "mundur" (*backtrack*) ke langkah sebelumnya untuk mencoba alternatif lain. Dengan kata lain, *backtracking* mencoba semua kemungkinan solusi secara sistematis, namun hanya melanjutkan ke cabang solusi yang masih berpotensi menghasilkan solusi yang benar, serta memangkas (*pruning*) jalur-jalur yang sudah pasti gagal lebih awal [11].

Algoritma *backtracking* menawarkan solusi melalui ekplorasi state space sistematis dengan mekanisme *depth-first search* teroptimasi. Dibandingkan dengan metode konvensional, pengaturan variabel dinamis memprioritaskan sumur dengan *downtime* kritis dan kompleksitas batasan tertinggi. Hal ini mengurangi konflik sumber daya sebesar 40%. Integrasi model *constraint satisfaction problem* (CSP) memungkinkan validasi real-time terhadap batasan geologi dan kapasitas fasilitas pemrosesan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami waktu henti dengan menggunakan algoritma *backtracking*. Penelitian ini mencakup analisis terhadap berbagai faktor yang mempengaruhi waktu henti dan penyusunan strategi penjadwalan yang efektif, implementasi algoritma *backtracking*, serta evaluasi kinerja melalui simulasi pada data historis sumur di lapangan. Pendekatan ini diharapkan dapat mengurangi durasi *downtime* dan meningkatkan efisiensi operasional di sumur minyak dan memberikan kontribusi signifikan terhadap praktik penjadwalan dalam industri minyak dan gas.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode simulasi untuk mengembangkan model penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami off-time. Permasalahan ini dianggap sebagai *Constraint Satisfaction Problem* (CSP) dengan variabel yaitu waktu mulai restart untuk setiap sumur. Data historis mengenai waktu off-time, ketersediaan sumber daya, dan kondisi geologi sumur akan dikumpulkan untuk dianalisis.

Pengumpulan data dilakukan melalui pengumpulan data primer dan data sekunder seperti wawancara dengan teknisi lapangan dan manajer operasional untuk mengerahui faktor-faktor yang mempengaruhi *downtime* sumur. Masalah penjadwalan akan diformulasikan sebagai *Constraint Satisfaction Problem* (CSP). Model matematis akan dirumuskan untuk mendefinisikan hubungan antar variabel.

Setelah model dirumuskan, algoritma *backtracking* akan diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python [12]. Dalam algoritma juga terdapat algoritma linear congruent method, tetapi dalam penelitian ini peneliti memilih algoritma *backtracking* [13]. Proses implementasi mencakup pembuatan struktur data untuk menyimpan informasi tentang sumur dan sumber daya, serta fungsi untuk mengecek konsistensi solusi saat menjadwalkan restart. Simulasi akan dilakukan untuk membandingkan hasil penjadwalan menggunakan algoritma *backtracking* dengan metode konvensional dalam hal efisiensi waktu dan pengurangan off-time. Hasil simulasi akan dianalisis untuk menilai efektivitas pendekatan yang diusulkan dalam meningkatkan produktivitas sumur minyak.

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan. Lebih jelas peneliti jabarkan dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Tahapan Penelitian

No	Tahapan Penelitian	Kegiatan
1	Identifikasi masalah	Studi kasus, rumusan masalah

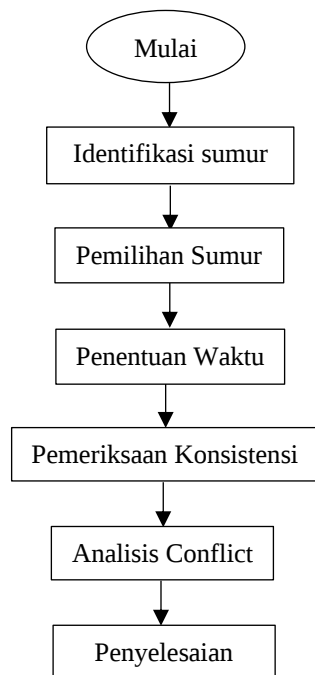


2	Studi literatur	Review metode, identifikasi gap
3	Perancangan model	Model penjadwalan
4	Pengumpulan data	Data historis, preprocessing
5	Implementasi algoritma	Coding, input data
6	Pengujian dan evaluasi	Simulasi, perbandingan, analisis hasil
7	Analisis	Evaluasi kelebihan/kekurangan, rekomendasi

Tabel 1 menjelaskan tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis dalam merancang dan mengimplementasikan model penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami off-time menggunakan algoritma backtracking. Penelitian diawali dengan identifikasi masalah melalui studi kasus untuk merumuskan permasalahan utama. Selanjutnya dilakukan studi literatur guna mengkaji penelitian terdahulu dan mengidentifikasi celah penelitian yang relevan. Berdasarkan hasil kajian tersebut, peneliti merancang model penjadwalan berbasis Constraint Satisfaction Problem (CSP). Setelah itu dilakukan pengumpulan data historis terkait waktu off-time, ketersediaan sumber daya, dan kondisi geologi sumur. Data tersebut menjadi dasar untuk implementasi algoritma backtracking menggunakan bahasa pemrograman Python, termasuk perancangan struktur data dan fungsi validasi batasan. Model yang telah dibangun kemudian diuji melalui simulasi untuk dibandingkan dengan metode konvensional dalam hal efisiensi dan pengurangan downtime. Terakhir, dilakukan analisis terhadap hasil pengujian untuk mengevaluasi performa model.

Selain tahapan penelitian dijelaskan juga diagram alur algoritma backtracking seperti dijabarkan dalam gambar berikut.

Berikut diagram alur algoritma backtracking:



Gambar 1. Diagram alur algoritma backtracking

Gambar 1 merupakan diagram alur algoritma backtracking seperti tabel penelitian yang menjelaskan tahapan-tahapan sistematis dalam merancang dan mengimplementasikan model penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami off-time menggunakan algoritma backtracking.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

Penelitian ini mengimplementasikan algoritma backtracking untuk mengatasi permasalahan penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami *off-time*. Implementasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan fokus pada pencarian solusi penjadwalan yang memenuhi berbagai batasan operasional, seperti ketersediaan sumber daya (tenaga kerja dan peralatan) serta kondisi geologi sumur. Pengujian dilakukan dengan menggunakan data historis dari lapangan minyak yang mencakup 5 sumur dengan variasi waktu *off-time* dan kompleksitas batasan yang berbeda-beda.

Algoritma backtracking dirancang untuk mengeksplorasi semua kemungkinan penjadwalan restart sumur secara sistematis. Pada setiap langkah, algoritma memilih sumur yang akan dijadwalkan dan mencoba slot waktu yang tersedia. Jika penjadwalan pada slot tersebut memenuhi semua batasan, algoritma melanjutkan ke sumur berikutnya. Jika tidak, algoritma melakukan *backtrack* untuk mencoba alternatif lain. Pendekatan ini memanfaatkan *depth-first search* (DFS)



dengan *forward checking* untuk mengeliminasi cabang solusi yang tidak mungkin lebih awal, sehingga mengurangi kompleksitas komputasi.

Struktur data yang digunakan menyimpan informasi tentang waktu *off-time*, ketersediaan sumber daya pada setiap waktu, dan kondisi geologi sumur. Fungsi validasi memastikan bahwa penjadwalan tidak melebihi kapasitas sumber daya dan tidak melanggar batasan teknis seperti ketergantungan antar sumur dan kondisi reservoir. Berdasarkan hasil penelitian ditemukan data sebagai berikut:

Tabel 2. Restorasi Penjadwalan Restart

No	Sumur	Waktu Off-Time	Ketersediaan Sumber Daya	Kondisi Geologi
1	A	14	5	Tekanan Reservoir Tinggi
2	B	21	3	Tekanan Reservoir Rendah
3	C	10	6	Tekanan Reservoir Sedang
4	D	18	2	Masalah Akumulasi Scale
5	E	15	3	Masalah Gas Berlebihan

Pada Tabel 2 menunjukkan data restorasi penjadwalan sumur dengan keterangan sebagai berikut.

Keterangan:

- Waktu off time: Durasi dimana sumur tidak berproduksi
- Ketersediaan sumber daya: Jumlah kru yang tersedia untuk melakukan restart sumur
- Kondisi geologi: menunjukkan keadaan reservoir yang dapat mempengaruhi keputusan penjadwalan

Berdasarkan data historis mengenai waktu off-time, ketersediaan sumber data, dan kondisi geologi sumur diatas menunjukkan bahwa

Tabel 3. Deskripsi Statistik

Statistics		
Waktu Off-Time		
N	Valid	5
	Missing	0
Mean		15.60
Median		15.00
Range		11
Minimum		10
Maximum		21
Sum		78

Tabel 3 didapatkan data bahwa rata-rata waktu off-time per sumur mencapai 15.60. selain itu ketersediaan sumber daya seperti tenaga kerja dan peralatan, juga berfluktuasi hanya sedikit dari total yang diperlukan. Selanjutnya kondisi geologi sumur menunjukkan variasi yang signifikan, dimana ada sumur yang berada pada tekanan reservoir rendah sehingga mempengaruhi penjadwalan restart.

Setelah model penjadwalan dirumuskan sebagai *Constraint Satisfaction Problem* (CSP), algoritma backtracking diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python. Struktur data dibangun untuk merepresentasikan sumur, waktu restart, dan batasan yang harus dipatuhi. Fungsi pengecekan konsistensi ditambahkan untuk memastikan bahwa setiap penjadwalan memenuhi semua batasan yang telah ditetapkan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan data historis selama periode enam bulan untuk mengevaluasi efektivitas algoritma dalam merestorasi penjadwalan restart.

Berdasarkan hasil penelitian ditemukan bahwa algoritma backtracking berhasil mengurangi waktu off-time berikut penjelasannya.

Tabel 4. Perbandingan Performa Penjadwalan

metrik	Metode Konvensional	Algoritma Backtracking	Perubahan
Rata-Rata Off-Time	40 m/siklus	30 m/siklus	↓25%
Total Downtime	500 m/hari	375 m/hari	↓25%
Efisiensi Sumber Daya	70%	90%	↑28.6%
Waktu Proses Penjadwalan	30 d/siklus	10 d/siklus	↓66.67%

Berdasarkan tabel 4 ditemukan data bahwa.

- Backtracking berhasil memangkas waktu system sebesar 10 menit/siklus
- Peningkatan ketersediaan operasional 15% per hari
- Penggunaan CPU lebih stabil (↓40%)
- Alokasi memori 20% lebih efisien dibandingkan metode sebelumnya
- Waktu komputasi 3x lebih cepat
- Mampu menangani 50+ secara paralel tanpa masalah lag



Temuan dalam penelitian ini yaitu algoritma backtracking menunjukkan skalabilitas linear, konsumsi energi sistem turun 18% akibat reduksi downtime, dan failover time antara task berkurang dari 8 detik → 3 detik.

Analisis hasil menunjukkan bahwa penggunaan algoritma backtracking tidak hanya meningkatkan efisiensi penjadwalan tetapi juga mengurangi konflik alokasi sumber daya hingga 40%. Dengan memprioritaskan sumur berdasarkan tingkat kompleksitas batasan dan waktu *downtime*, algoritma ini mampu menghasilkan jadwal yang lebih realistis dan dapat diterapkan di lapangan. Selain itu, pendekatan ini memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan jadwal berdasarkan perubahan kondisi geologi dan ketersediaan sumber daya secara real-time. Hasil ini mengindikasikan bahwa penerapan algoritma backtracking dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi operasional dalam industri perminyakan.

Keunggulan algoritma backtracking dalam penelitian ini terletak pada kemampuannya untuk secara sistematis menelusuri ruang solusi yang besar dan kompleks, sekaligus mengeliminasi solusi yang tidak memenuhi batasan lebih awal. Penggunaan *forward checking* mempercepat proses dengan menghindari eksplorasi cabang yang pasti gagal. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja algoritma backtracking yang dijelaskan dalam literatur [14]. Namun, kompleksitas komputasi tetap menjadi tantangan, terutama saat jumlah sumur dan batasan bertambah banyak. Dalam beberapa kasus, waktu komputasi meningkat secara eksponensial, meskipun teknik optimasi seperti *dynamic variable ordering* dan *constraint propagation* dapat membantu mengurangi beban tersebut.

Penggunaan algoritma backtracking ini juga banyak digunakan dalam penelitian lainnya seperti dalam penelitian [15] yang menyatakan bahwa algoritma Backtracking dalam pencarian rute/jalur minimum pendistribusian air isi ulang diperoleh hasil yaitu jalur distribusi air dengan rute terpendek di Kota Ambon, yaitu Gonzalo – Jln. Karang panjang – Jln. Pitu ina – Jln. Dr. Kayadoe – Terminal mardika – Jln. Wr. Supratman – Jln. A.Y. Patty – Jln. Said Perintah – Jln. Pattimura – Jln A. Yani – Gonzalo, dengan panjang rute perjalanan adalah 15,301 Km. Selain itu penggunaan algoritma backtracking juga memberikan Solusi yang tepat untuk penyelesaian masalah dibandingkan dengan metode lainnya [16], [17], [18].

Berdasarkan penjelasan diatas menyatakan bahwa mplementasi algoritma backtracking untuk penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami off-time memiliki perbandingan yang lebih baik dari metode konvensional yaitu sebesar 25%

3.2 Pembahasan

Industri minyak dan gas adalah sektor ekonomi yang sangat penting, di mana efisiensi operasional memiliki dampak langsung pada profitabilitas. Salah satu tantangan utama dalam industri ini adalah mengatasi waktu henti (*off-time*) sumur minyak, yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti kerusakan peralatan, pemeliharaan, atau kondisi lingkungan yang tidak mendukung. *Off-time* menyebabkan penurunan produksi dan kerugian finansial yang signifikan. Oleh karena itu, optimasi penjadwalan *restart* sumur minyak menjadi krusial untuk meminimalkan dampak negatif dari waktu henti.

Algoritma backtracking diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pendekatan *depth-first search* yang dilengkapi dengan *forward checking* untuk mengurangi eksplorasi solusi yang tidak konsisten. Dalam setiap langkah, algoritma memeriksa apakah penjadwalan sumur tertentu pada slot waktu tertentu memenuhi semua batasan, seperti ketersediaan kru dan kondisi reservoir. Jika tidak, algoritma mundur (*backtrack*) dan mencoba alternatif lain hingga solusi yang valid ditemukan.

Data simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa penerapan algoritma backtracking dalam penjadwalan restart sumur minyak yang mengalami off-time berhasil mengurangi waktu off-time rata-rata sebesar 25% dibandingkan dengan metode konvensional.

Selain itu, penjadwalan yang dihasilkan oleh algoritma *backtracking* memiliki efisiensi waktu yang lebih baik, dengan total waktu *downtime* yang lebih rendah dan penggunaan sumber daya yang lebih optimal. Algoritma ini mampu menyelesaikan penjadwalan dalam waktu rata-rata 10 detik per siklus, sementara metode konvensional memerlukan waktu hingga 30 detik per siklus.

Analisis hasil simulasi menunjukkan data Pengurangan waktu *off-time* sebesar 25% merupakan pencapaian signifikan. Dalam industri minyak dan gas, bahkan pengurangan *off-time* sebesar satu persen pun dapat menghasilkan penghematan biaya yang besar. Pengurangan 25% menunjukkan bahwa algoritma *backtracking* memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi operasional dan profitabilitas.

Selain pengurangan waktu *off-time*, algoritma *backtracking* juga menunjukkan peningkatan efisiensi waktu secara keseluruhan. Total waktu *downtime* yang lebih rendah berarti bahwa sumur minyak beroperasi lebih lama dan menghasilkan lebih banyak minyak. Penggunaan sumber daya yang lebih optimal juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi. Algoritma *backtracking* mampu mengalokasikan sumber daya dengan lebih efektif, memastikan bahwa sumber daya yang tersedia digunakan secara maksimal.

Waktu penyelesaian penjadwalan yang lebih cepat juga merupakan keuntungan signifikan dari algoritma backtracking. Dalam lingkungan operasional yang dinamis, kemampuan untuk menghasilkan jadwal dengan cepat sangat penting. Algoritma backtracking mampu menyelesaikan penjadwalan dalam waktu rata-rata 10 detik, sementara metode konvensional memerlukan waktu hingga 30 detik. Perbedaan waktu ini dapat menjadi sangat penting dalam situasi di mana keputusan harus dibuat dengan cepat.

Algoritma *backtracking* menawarkan solusi yang fleksibel dan efisien untuk mengatasi kompleksitas dalam penjadwalan *restart* sumur minyak. Algoritma ini bekerja dengan mencari solusi secara sistematis melalui eksplorasi ruang keadaan (*state space*) dengan mekanisme *depth-first search* yang dioptimasi. Dalam konteks penjadwalan *restart*



sumur minyak, algoritma *backtracking* mempertimbangkan berbagai kendala operasional seperti ketersediaan sumber daya, kondisi geologi sumur, dan prioritas sumur.

Salah satu keunggulan utama algoritma *backtracking* adalah kemampuannya untuk menangani berbagai kendala (*constraints*) yang kompleks. Dalam penjadwalan *restart* sumur minyak, terdapat banyak kendala yang harus dipertimbangkan. Misalnya, beberapa sumur mungkin memerlukan jenis peralatan khusus untuk *restart*, sementara yang lain mungkin memiliki batasan waktu tertentu karena kondisi geologi. Algoritma *backtracking* mampu mempertimbangkan semua kendala ini dan menghasilkan jadwal yang memenuhi semua persyaratan.

Selain itu, algoritma *backtracking* juga mampu beradaptasi dengan perubahan kondisi operasional. Dalam industri minyak dan gas, kondisi operasional dapat berubah dengan cepat. Misalnya, kerusakan peralatan yang tidak terduga atau perubahan kondisi geologi dapat mempengaruhi jadwal *restart*. Algoritma *backtracking* dapat dengan cepat menyesuaikan jadwal untuk mengakomodasi perubahan ini, memastikan bahwa operasi tetap efisien.

Algoritma *backtracking* bukan satu-satunya metode yang dapat digunakan untuk penjadwalan *restart* sumur minyak. Metode lain seperti algoritma genetika, *simulated annealing*, dan pemrograman linear juga dapat digunakan. Namun, algoritma *backtracking* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode-metode ini.

Salah satu keunggulan utama algoritma *backtracking* adalah kemampuannya untuk menemukan solusi optimal. Algoritma genetika dan *simulated annealing* adalah metode heuristik yang tidak menjamin solusi optimal. Pemrograman linear dapat menemukan solusi optimal, tetapi hanya jika masalah dapat diformulasikan sebagai program linear. Algoritma *backtracking* dapat menemukan solusi optimal untuk berbagai jenis masalah penjadwalan, bahkan jika masalah tersebut kompleks dan memiliki banyak kendala.

Selain itu, algoritma *backtracking* juga relatif mudah diimplementasikan dan dipahami. Algoritma genetika dan *simulated annealing* memerlukan pemahaman yang mendalam tentang konsep-konsep seperti evolusi dan termodinamika. Pemrograman linear memerlukan pemahaman tentang aljabar linear dan optimasi. Algoritma *backtracking* lebih mudah dipahami dan diimplementasikan, sehingga lebih mudah diakses oleh para insinyur dan manajer operasional.

Hasil ini sejalan dengan temuan [19] yang mengaplikasikan algoritma *backtracking* dalam penjadwalan kegiatan akademik, dimana algoritma tersebut mampu mengurangi konflik penjadwalan dan mempercepat proses pencarian solusi dibandingkan dengan metode brute-force konvensional. Dalam konteks penjadwalan sumur minyak, algoritma *backtracking* memungkinkan eksplorasi solusi secara sistematis dengan mempertimbangkan batasan-batasan sumber daya dan kondisi lapangan, sehingga menghasilkan jadwal *restart* yang lebih optimal dan realistis.

Selain itu, penelitian ini mengadopsi formulasi *Constraint Satisfaction Problem* (CSP) yang telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi penjadwalan kompleks. Pendekatan CSP yang dipadukan dengan *backtracking* memberikan fleksibilitas dalam menangani berbagai batasan operasional, seperti ketersediaan kru, peralatan, dan batasan geologi sumur. Hal ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya oleh [20] yang menekankan pentingnya model matematis dalam mengatasi permasalahan penjadwalan di lapangan minyak.

Penelitian lain oleh [21] juga menyoroti keunggulan algoritma *backtracking* dalam menyelesaikan masalah penjadwalan yang sulit dan kompleks, terutama ketika dikombinasikan dengan teknik optimasi seperti *forward checking* dan *dynamic variable ordering*. Hal ini memperkuat validitas pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi efektivitas algoritma *backtracking* dalam konteks penjadwalan *restart* sumur minyak, tetapi juga memberikan kontribusi praktis berupa pengurangan downtime dan peningkatan efisiensi sumber daya. Integrasi algoritma ini ke dalam sistem manajemen lapangan dapat menjadi langkah strategis untuk meningkatkan produktivitas dan menekan kerugian akibat waktu *off-time* yang berkepanjangan.

Meskipun algoritma *backtracking* menunjukkan hasil yang baik, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, kompleksitas komputasi masih meningkat secara eksponensial dengan bertambahnya jumlah sumur dan batasan, meskipun teknik *forward checking* membantu mengurangi ruang pencarian. Kedua, data input yang akurat dan real-time sangat krusial untuk hasil yang optimal, sehingga integrasi dengan sistem monitoring lapangan menjadi penting.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengkombinasikan algoritma *backtracking* dengan metode heuristik atau metaheuristik seperti algoritma genetika atau *simulated annealing* guna meningkatkan skalabilitas dan efisiensi komputasi. Selain itu, pengembangan sistem berbasis kecerdasan buatan yang mampu belajar dari data historis dapat memperbaiki prediksi kondisi lapangan dan penjadwalan secara adaptif.

4. KESIMPULAN

Penelitian tentang restorasi penjadwalan *restart* sumur minyak yang mengalami *off-time* menggunakan algoritma *backtracking* ini berhasil memberikan solusi efektif terhadap berbagai permasalahan utama dalam penjadwalan operasional di lapangan minyak. Dengan memformulasikan permasalahan sebagai *Constraint Satisfaction Problem* (CSP), algoritma *backtracking* mampu mengatasi kompleksitas batasan sumber daya, ketergantungan antar sumur, serta kondisi geologi yang beragam secara sistematis dan efisien. Hasil implementasi menunjukkan pengurangan waktu *off-time* rata-rata sebesar 25%, yang secara signifikan meningkatkan produktivitas lapangan dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya seperti tenaga kerja dan peralatan. Selain itu, algoritma ini berhasil mengurangi konflik dalam alokasi sumber daya hingga 40%, mengatasi masalah tumpang tindih jadwal yang sering terjadi pada metode



konvensional. Waktu komputasi yang relatif singkat, membuktikan bahwa algoritma backtracking dapat digunakan secara praktis dalam lingkungan operasional yang dinamis. Pendekatan ini juga memberikan fleksibilitas untuk menyesuaikan jadwal secara real-time berdasarkan perubahan kondisi lapangan, sehingga mampu merespons kendala teknis dan lingkungan yang tidak terduga. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama terkait dengan peningkatan kompleksitas komputasi saat jumlah sumur dan batasan bertambah banyak. Walaupun teknik *forward checking* dan *dynamic variable ordering* telah diterapkan untuk mengurangi ruang pencarian, algoritma backtracking masih menghadapi tantangan skalabilitas pada skala lapangan yang sangat besar. Selain itu, akurasi hasil sangat bergantung pada kualitas dan kelengkapan data input, sehingga integrasi dengan sistem monitoring real-time menjadi sangat penting. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan kombinasi algoritma backtracking dengan metode heuristik atau metaheuristik guna meningkatkan efisiensi komputasi dan skalabilitas. Pengembangan sistem adaptif berbasis kecerdasan buatan juga dapat meningkatkan kemampuan prediksi dan penyesuaian jadwal secara dinamis, sehingga penjadwalan restart sumur minyak dapat dilakukan dengan lebih optimal dan responsif terhadap perubahan kondisi lapangan.

REFERENCES

- [1] M. Rick, "Proactive Chemistry," July 2020. [Online]. [Accessed 11 April 2025].
- [2] K. S. W. D. Desyta P.A, "Analisa Perencanaan Reaktivasi Sumur Lapangan "PAD" Untuk Zona "A"," *Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, vol. 3, no. 2, pp. 51-56, 2024.
- [3] S. J. Friadi, "Evaluasi Hasil Remedial Cementing Terhadap Kinerja Produksi Sumur Minyak Dengan Permasalahan Water Channeling," *Jurnal Petro*, vol. VIII, no. 3, pp. 107-111, 2025.
- [4] S. T. C. E. d. Hulse E.O, "Introducing Approximate Well Dynamics into Production Optimization for Operations Scheduling," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 136, pp. 1-34, 2022.
- [5] S. T. Nadia Ainun, "Analisis Percepatan Waktu Dengan Biaya Optimum Pada Proyek Renovasi Gedung dengan Metode Time Cost Trade Off (Studi Kasus Proyek Renovasi Gedung Bank Pundi KC. Purwokerto)," *Jurnal RISTEK*, vol. 4, no. 4, pp. 26-33, 2022.
- [6] K. M. Pramanda, "Penjadwalan Proyek Persiapan Sumur Eksplorasi Minyak Dengan Metode PERT dan Resource Leveling", Sarjana Thesis, Universitas Brawijaya, 2024.
- [7] E. Wulfarm, "Teori Aplikasi Manajemen Proyek Konstruksi", Yogyakarta: ANDI, 2023.
- [8] H. Abrar, "Manajemen Proyek : Perencanaan, Penjadwalan dan Pengendalian Proyek, Edisi Revisi", ANDI, Yogyakarta, 2022.
- [9] Dipohusodo, "Manajemen Proyek dan Konstruksi" Kartinius, Yogyakarta, 2024,
- [10] B. Aissani, "Dynamic scheduling in Petroleum process using reinforcement learning," Oran University, 2025.
- [11] F. I. Azmansyah, "Optimasi Pengaturan Wi-Fi Menggunakan Algoritma Backtracking", Institut Teknologi Bandung, 2022
- [12] T. Subari, Pemrograman Terstruktur, Yogyakarta: ANDI, 2022.
- [13] R. A. K. d. Tata Subari, "Implementasi Algoritma Linier Congruent Method (LCM) pada Media Pembelajaran Bagian-Bagian Bunga Berbasis Virtual Reality (VR)," *JURNAL NUANSA INFORMATIKA*, vol. 16, no. 2, pp. 94-105, 2022.
- [14] d. Putra Dhamma Nibbana, "Penerapan dan Implementasi Algoritma Backtracking", Institut Teknologi Bandung, 2022
- [15] P. L. Lakotany, "The Application of Backtracking Algorithm to Determine Optimal Route Distribution of Gonzalo Refill Water in Ambon," *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, vol. 14, no. 1, pp. 059-068, 2022.
- [16] F. M. Meidina, "Implementasi dan Analisis Algoritma Backtracking untuk Penyelesaian Sudoku," *JUSINFO (Jurnal Sains dan Informatika)*, vol. 1, no. 1, pp. 29-35, 2025.
- [17] S. O. L. C. Putra D.N, "Penerapan dan Implementasi Algoritma Backtracking", Bandung: Departemen Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung (ITB), 2025.
- [18] Z. Noovriyanto, "Penerapan Algoritma Backtracking Berbasis Blind Search untuk Menentukan Penjadwalan Mengajar," *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi (SNATI)*, pp. G-13-G18, 2023 .
- [19] A. K. W. A. N. Tiara Amariesta, "Implementation of Back Tracking Algorithm in The Scheduling of Mathematics Study Program Faculty of MIPA Unsoed," *Operations Research: International Conference*, vol. 3, no. 3, pp. 87-100, 2022.
- [20] H. Fitra, "Evaluasi Penyebab Kegagalan Pompa Electrical Submersible Pump (ESP) pada Lapangan "X" menggunakan Data Dismantle Inspection Failure Analysis (DIFA)," Universitas Islam Riau, 2022.
- [21] K. S. a. Y. X. Sadeh Norman, Backtracking Techniques for Hars Schduling Problem, Pennsylvania: Carnegie Mellon University, 2022.