

Penerapan Algoritma Greedy: Optimasi Penyusunan Playlist Lagu untuk Menjaga Stabilitas Cadence Pelari Jarak Jauh

Muhammad Azzam Robbani - 18223025

Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10 Bandung

E-mail: azzamrobbani2005@gmail.com , 18223025@std.stei.itb.ac.id

Abstrak—Cadence atau frekuensi langkah merupakan salah satu parameter biomekanik yang turut menentukan efisiensi lari jarak jauh sekaligus risiko cedera akibat pola langkah yang tidak stabil. Berbagai penelitian olahraga melaporkan bahwa musik dengan tempo (BPM) yang selaras dengan cadence pelari dapat membantu menjaga ritme langkah melalui mekanisme entrainment auditori-motorik, yaitu kecenderungan tubuh menyesuaikan gerakan ritmis terhadap rangsangan bunyi periodik. Namun demikian, menyusun daftar putar (playlist) secara manual agar BPM setiap lagu berada pada rentang target sekaligus transisi tempo antar lagu tetap mulus merupakan pekerjaan yang melelahkan, memakan waktu, dan rawan kesalahan apabila jumlah lagu yang tersedia cukup besar. Makalah ini mengusulkan penerapan algoritma greedy untuk menyusun playlist lagu yang menjaga cadence pelari pada rentang target 170 hingga 180 langkah per menit, dengan asumsi satu ketukan musik dipetakan ke satu langkah kaki. Strategi greedy yang dirancang memilih, pada setiap iterasi, lagu dengan BPM paling mendekati BPM lagu sebelumnya dari himpunan kandidat yang belum terpakai dan masih berada pada batas toleransi transisi yang ditetapkan. Pengujian dilakukan terhadap satu set data fiktif berisi 15 lagu dengan variasi BPM yang representatif. Hasil simulasi menunjukkan algoritma berhasil menyusun sembilan dari lima belas lagu menjadi satu rangkaian playlist yang seluruhnya berada pada rentang target, dengan rata-rata transisi BPM antar lagu jauh lebih kecil dibandingkan baseline pengurutan acak. Kompleksitas waktu algoritma ini adalah $O(n^2)$ untuk pemeriksaan kandidat secara linear pada tiap iterasi, dengan ruang tambahan $O(n)$.

Kata Kunci—*algoritma greedy; cadence; playlist; beats per minute; lari jarak jauh; optimasi kombinatorial*

I. PENDAHULUAN

Lari jarak jauh adalah salah satu bentuk olahraga ketahanan yang paling banyak digemari karena kemudahan aksesnya, baik di jalan raya, lintasan, maupun jalur alam terbuka. Salah satu parameter biomekanik yang menentukan efisiensi dan keamanan lari adalah cadence, yaitu jumlah langkah kaki yang diayunkan dalam satu menit, lazim disingkat spm (steps per minute). Cadence yang terlampaui rendah pada kecepatan tertentu umumnya berkorelasi dengan overstriding, yaitu kondisi pendaratan kaki yang terlalu jauh di depan titik berat tubuh, yang pada gilirannya meningkatkan

beban tumbukan pada sendi lutut dan pergelangan kaki. Sebaliknya, cadence yang stabil pada rentang yang sesuai dengan karakteristik individu pelari terbukti menurunkan risiko cedera akibat penggunaan berlebihan (overuse injury) pada struktur tulang dan jaringan ikat tungkai bawah.

Salah satu intervensi non-invasif yang banyak diteliti untuk membantu pelari menjaga cadence adalah pemanfaatan musik dengan tempo tertentu. Fenomena ini dikenal sebagai auditory-motor synchronization atau entrainment, yakni kecenderungan alami sistem motorik manusia untuk menyelaraskan gerakan berulang, termasuk langkah kaki, terhadap ketukan musik yang didengarkan. Ketika tempo musik dinyatakan dalam satuan beats per minute (BPM) diselaraskan dengan cadence target pelari, ketukan musik berfungsi sebagai metronom eksternal yang membantu menstabilkan ritme langkah tanpa memerlukan instrumen pengukuran tambahan di lapangan.

Permasalahan praktis muncul ketika seorang pelari atau pelatih ingin menyusun sendiri sebuah playlist dari koleksi lagu yang dimiliki, sedemikian rupa sehingga seluruh atau sebagian besar lagu dalam playlist tersebut memiliki BPM pada rentang target cadence, misalnya 170 hingga 180 spm, sekaligus transisi BPM dari satu lagu ke lagu berikutnya tidak terlampaui drastis sehingga tidak mengganggu ritme yang sudah terbentuk. Apabila koleksi lagu berjumlah puluhan hingga ratusan judul, penyusunan manual menjadi pekerjaan yang melelahkan, subjektif, dan rentan menghasilkan urutan yang tidak optimal.

Permasalahan penyusunan playlist semacam ini pada dasarnya adalah permasalahan optimasi kombinatorial: memilih dan mengurutkan sebagian dari himpunan lagu yang tersedia sedemikian rupa sehingga suatu fungsi objektif, dalam hal ini stabilitas BPM, dapat dimaksimalkan atau setidaknya didekati nilai optimalnya. Pendekatan pencarian ekshaustif (brute force) terhadap seluruh kemungkinan permutasi lagu memiliki kompleksitas waktu faktorial, $O(n!)$, yang menjadi tidak praktis bahkan untuk koleksi lagu yang berjumlah puluhan. Di sisi lain, pendekatan program dinamis memang dapat menjamin solusi optimal pada beberapa formulasi, tetapi memerlukan tabulasi keadaan yang kompleksitas ruangnya

bertumbuh signifikan seiring jumlah lagu, sehingga kurang sesuai untuk implementasi ringan pada aplikasi pemutar musik di perangkat bergerak.

Algoritma greedy menawarkan jalan tengah yang menarik. Sebagai strategi yang membuat keputusan lokal terbaik pada setiap langkah tanpa melakukan penelusuran ulang (backtracking), algoritma greedy umumnya memiliki kompleksitas waktu yang jauh lebih rendah dibandingkan pencarian ekshaustif maupun program dinamis, dengan kebutuhan ruang memori yang minimal. Meskipun greedy tidak selalu menjamin solusi optimal secara global pada setiap formulasi masalah, pendekatan ini terbukti efektif pada banyak permasalahan penjadwalan dan pengurutan yang memiliki struktur mirip, seperti interval scheduling dan minimum spanning tree, sehingga layak diuji penerapannya pada permasalahan penyusunan playlist berbasis cadence.

Berdasarkan latar belakang tersebut, makalah ini merumuskan permasalahan sebagai berikut: bagaimana merancang dan menerapkan algoritma greedy untuk menyusun urutan playlist dari suatu himpunan lagu, sedemikian rupa sehingga BPM setiap lagu berada pada rentang target cadence pelari dan transisi BPM antar lagu yang berurutan diminimalkan. Tujuan makalah ini adalah memodelkan permasalahan tersebut secara matematis, merancang algoritma greedy beserta pseudocode dan analisis kompleksitasnya, serta menguji penerapan algoritma tersebut pada suatu dataset lagu fiktif untuk mengevaluasi kinerjanya dibandingkan dengan pendekatan baseline yang lebih sederhana.

Sistematika penulisan makalah ini adalah sebagai berikut. Bagian II membahas tinjauan pustaka mengenai hubungan cadence dan musik serta landasan teori algoritma greedy. Bagian III menjelaskan metodologi, meliputi pemodelan matematis, pseudocode, dan analisis kompleksitas. Bagian IV memaparkan eksperimen dan hasil pengujian algoritma terhadap dataset lagu fiktif. Bagian V berisi kesimpulan dan saran pengembangan lebih lanjut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Cadence dan Sinkronisasi Musik-Gerak

Penelitian mengenai hubungan antara tempo musik dan cadence lari telah berkembang dalam dekade terakhir pada bidang ilmu keolahragaan. Van Dyck dkk. melakukan eksperimen lapangan yang menunjukkan bahwa cadence pelari rekreasi secara alami berkisar antara 130 hingga 200 langkah per menit, dan ketika musik dengan tempo yang disesuaikan terhadap cadence awal pelari diperdengarkan, terjadi penyesuaian ritme langkah yang konsisten terhadap perubahan tempo musik tersebut [3]. Temuan ini memperkuat dasar bahwa BPM musik dapat dijadikan sarana eksternal untuk mengarahkan cadence menuju rentang target tertentu.

Bood dkk. mengamati fenomena auditory-motor synchronization secara lebih mendalam dengan membandingkan kondisi lari tanpa musik, dengan musik motivasional yang BPM-nya disesuaikan terhadap frekuensi langkah, dan dengan ketukan metronom murni [4]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konsistensi cadence paling stabil tercapai ketika ketukan eksternal hadir secara konstan dan jelas sepanjang durasi lagu, sementara musik

motivasional yang temponya kurang tegas memberikan efek yang lebih bervariasi. Implikasi praktis dari temuan ini adalah pentingnya memilih lagu dengan tempo yang stabil dan konsisten, bukan sekadar BPM rata-rata yang sesuai target.

Penelitian lain oleh Buhmann dkk. mengkaji strategi penyalarsan musik terhadap gerakan lari dari sisi fase ketukan, tidak hanya tempo semata, dan menemukan bahwa keselarasan fase antara hentakan kaki dan ketukan musik turut memengaruhi tingkat motivasi serta perubahan cadence pelari [5]. Walaupun makalah ini tidak memodelkan keselarasan fase secara eksplisit, temuan tersebut menjadi pengingat bahwa pemilihan lagu berbasis BPM merupakan penyederhanaan yang wajar untuk tahap awal optimasi, namun dapat dikembangkan lebih jauh pada penelitian mendatang.

Pada ranah aplikatif, telah terdapat pula upaya merancang sistem pemilihan lagu otomatis berbasis kecocokan tempo dengan frekuensi langkah pengguna, yang melibatkan teknik time stretching untuk menyesuaikan BPM lagu dalam rentang regangan tertentu agar tetap dapat disinkronkan dengan stride frequency pengguna secara real-time. Pendekatan semacam ini menegaskan bahwa permasalahan pencocokan lagu terhadap target tempo bukan sekadar isu teoretis, melainkan telah menjadi kebutuhan nyata pada produk pemutar musik untuk olahraga.

B. Algoritma Greedy

Algoritma greedy adalah salah satu strategi algoritma dalam menyelesaikan permasalahan optimasi yang bekerja dengan membuat keputusan yang dianggap terbaik secara lokal pada setiap langkah, dengan harapan rangkaian keputusan lokal tersebut akan mengarah pada solusi yang baik secara global [1]. Berbeda dengan program dinamis yang mempertimbangkan seluruh subpermasalahan dan menyimpan hasilnya, algoritma greedy tidak melakukan penelusuran ulang atas keputusan yang telah diambil sebelumnya, sehingga umumnya lebih sederhana untuk diimplementasikan dan lebih ringan secara komputasi.

Dua sifat penting yang umumnya digunakan untuk membuktikan bahwa suatu strategi greedy menghasilkan solusi optimal adalah greedy choice property dan optimal substructure [1], [2]. Greedy choice property menyatakan bahwa keputusan optimal global dapat selalu dicapai dengan membuat pilihan yang optimal secara lokal pada setiap langkah, sedangkan optimal substructure menyatakan bahwa solusi optimal dari suatu permasalahan dapat dibangun dari solusi optimal subpermasalahan yang lebih kecil setelah pilihan greedy pertama ditetapkan. Pembuktian formal bahwa kedua sifat tersebut berlaku pada suatu permasalahan biasanya dilakukan melalui teknik yang disebut exchange argument, yaitu menunjukkan bahwa solusi optimal mana pun selalu dapat dimodifikasi langkah demi langkah menjadi solusi yang dihasilkan algoritma greedy tanpa mengurangi kualitas solusi tersebut [2].

Contoh klasik permasalahan yang dapat diselesaikan secara optimal dengan algoritma greedy adalah interval scheduling, yaitu memilih sebanyak mungkin aktivitas yang tidak saling tumpang tindih waktunya dari suatu himpunan aktivitas. Strategi greedy yang terbukti optimal pada

permasalahan ini adalah selalu memilih aktivitas dengan waktu selesai paling awal di antara aktivitas yang masih kompatibel dengan aktivitas yang sudah terpilih sebelumnya [2]. Namun perlu dicatat bahwa tidak semua kriteria greedy yang terlihat intuitif menghasilkan solusi optimal; sebagai contoh, pada permasalahan penukaran uang dengan sistem denominasi tertentu, strategi memilih nilai pecahan terbesar terlebih dahulu tidak selalu menghasilkan jumlah pecahan minimum, sehingga validitas suatu strategi greedy senantiasa bergantung pada struktur spesifik permasalahan yang dihadapi [1].

Permasalahan penyusunan playlist berbasis kestabilan BPM yang diangkat dalam makalah ini memiliki kemiripan struktural dengan permasalahan penjadwalan, di mana setiap lagu dapat dipandang sebagai unit yang memiliki atribut BPM yang harus diselaraskan terhadap kondisi sebelumnya. Namun, karena fungsi objektifnya melibatkan minimisasi selisih BPM antar elemen yang berurutan, bukan sekadar memaksimalkan jumlah elemen yang kompatibel, maka pembuktian optimalitas global strategi greedy yang diusulkan tidak dapat langsung disamakan dengan pembuktian pada interval scheduling klasik, dan hal ini akan dibahas lebih lanjut pada bagian metodologi dan diskusi keterbatasan.

III. METODOLOGI

A. Definisi Masalah Secara Formal

Diberikan suatu himpunan lagu $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ dengan n adalah jumlah lagu yang tersedia. Setiap lagu s_i memiliki dua atribut utama, yaitu tempo $bpm(s_i)$ dalam satuan ketukan per menit, dan durasi $dur(s_i)$ dalam satuan detik. Diberikan pula rentang target cadence pelari $[L, U]$, pada makalah ini ditetapkan $L = 170$ dan $U = 180$ langkah per menit, serta ambang batas toleransi transisi δ yang menyatakan selisih BPM maksimum yang masih dapat ditoleransi antara dua lagu yang berurutan dalam playlist tanpa mengganggu ritme lari dengan signifikan.

Tujuan dari algoritma adalah menghasilkan suatu barisan $P = (p_1, p_2, \dots, p_k)$, yang merupakan subhimpunan terurut dari S , sedemikian rupa sehingga tiga kondisi berikut terpenuhi. Pertama, setiap lagu dalam P memiliki BPM pada rentang $[L, U]$. Kedua, selisih BPM antara dua lagu yang berurutan dalam P tidak melebihi ambang toleransi δ . Ketiga, jumlah lagu k dalam P diusahakan sebanyak mungkin, atau ekuivalen, total durasi playlist diusahakan semaksimal mungkin, sebagai proksi dari lamanya sesi lari yang dapat didampingi musik dengan cadence yang stabil.

Permasalahan ini secara formal dapat dipandang sebagai varian dari permasalahan pencarian lintasan terpanjang pada graf berarah, di mana setiap lagu direpresentasikan sebagai node dan terdapat sisi dari lagu a ke lagu b apabila $|bpm(b) - bpm(a)| \leq \delta$ serta $bpm(b)$ berada pada rentang $[L, U]$. Mencari rangkaian lagu terpanjang yang memenuhi seluruh kendala transisi tersebut ekuivalen dengan mencari lintasan terpanjang pada graf tersebut, yang secara umum merupakan permasalahan NP-Hard apabila tidak ada batasan struktur tambahan pada graf. Oleh karena itu, alih-alih mencari solusi optimal global yang berbiaya komputasi tinggi, makalah ini menggunakan pendekatan greedy yang berorientasi pada

solusi yang baik secara praktis dengan biaya komputasi rendah.

B. Definisi Masalah Secara Formal

Didefinisikan fungsi biaya transisi antara dua lagu a dan b sebagai berikut:

$$\text{cost}(a, b) = |bpm(b) - bpm(a)| \quad (1)$$

Fungsi biaya ini merepresentasikan besarnya gangguan ritme yang dialami pelari ketika transisi terjadi dari lagu a ke lagu b . Selanjutnya, didefinisikan himpunan kandidat yang valid pada iterasi ke- i , yaitu himpunan lagu yang belum digunakan, berada pada rentang target, dan memenuhi batas toleransi transisi terhadap lagu yang sedang aktif:

$$C(i) = \{s \in R \mid L \leq bpm(s) \leq U \wedge \text{cost}(\text{cur}, s) \leq \delta\} \quad (2)$$

dengan R menyatakan himpunan lagu yang masih tersisa atau belum dipilih, dan cur menyatakan lagu yang terakhir dipilih ke dalam playlist. Strategi greedy yang diusulkan pada setiap iterasi memilih elemen dari $C(i)$ yang meminimalkan fungsi biaya transisi terhadap lagu aktif:

$$\text{next} = \text{argmin}_{s \in C(i)} \text{cost}(\text{cur}, s) \quad (3)$$

Pemilihan lagu pertama p_1 sedikit berbeda karena belum ada lagu aktif sebelumnya. Pada makalah ini, lagu pertama dipilih sebagai lagu dalam rentang $[L, U]$ yang BPM-nya paling mendekati titik tengah rentang target, $\text{mid} = (L + U) / 2$, dengan rumus:

$$p_1 = \text{argmin}_{s \in S} |bpm(s) - \text{mid}|, s \in \{s \in S \mid L \leq bpm(s) \leq U\} \quad (4)$$

Pemilihan titik tengah sebagai acuan awal didasarkan pada pertimbangan bahwa lagu pertama yang BPM-nya berada di tengah rentang target memberikan ruang gerak (slack) paling seimbang untuk transisi ke lagu-lagu berikutnya, baik yang BPM-nya sedikit lebih tinggi maupun lebih rendah, dibandingkan jika lagu pertama dipilih pada salah satu ujung rentang target.

Algoritma berhenti ketika himpunan kandidat valid $C(i)$ pada suatu iterasi menjadi himpunan kosong, yang berarti tidak ada lagi lagu tersisa yang dapat disambungkan ke playlist tanpa melanggar kendala rentang BPM atau toleransi transisi. Pada titik tersebut, algoritma mengembalikan playlist P yang telah terbentuk sebagai solusi akhir.

Penting untuk ditekankan bahwa strategi greedy ini bersifat myopic atau berpandangan jangka pendek: pemilihan lagu dengan biaya transisi minimum pada satu iterasi tidak memperhitungkan dampaknya terhadap ketersediaan kandidat pada iterasi-iterasi berikutnya. Akibatnya, algoritma ini tidak dapat dijamin selalu menghasilkan playlist dengan jumlah lagu maksimum secara global, sebagaimana akan didemonstrasikan dan didiskusikan pada bagian eksperimen dan keterbatasan.

C. Analisis Kompleksitas Waktu dan Ruang

Misalkan n menyatakan jumlah total lagu dalam himpunan S . Pemilihan lagu pertama pada baris 3 dan 6 memerlukan satu kali pemeriksaan terhadap seluruh n lagu untuk membentuk kandidatAwal, sehingga membutuhkan waktu $O(n)$. Pada bagian pengulangan utama (baris 10–18), setiap iterasi memeriksa seluruh lagu yang tersisa di R untuk membentuk

himpunan kandidat C , yang dalam kondisi terburuk memerlukan waktu $O(n)$ per iterasi. Karena pengulangan dapat berjalan hingga maksimum n kali, yaitu satu kali untuk setiap lagu yang berpotensi masuk ke dalam playlist, maka kompleksitas waktu total algoritma ini pada kondisi terburuk adalah:

$$T(n) = O(n) + O(n) \times O(n) = O(n^2)(5)$$

Kompleksitas kuadratik ini muncul karena pada setiap iterasi, algoritma melakukan pemindaian linear terhadap seluruh lagu yang tersisa untuk menemukan kandidat dengan biaya transisi minimum. Apabila lagu-lagu pada himpunan S terlebih dahulu diurutkan berdasarkan BPM menggunakan algoritma pengurutan dengan kompleksitas $O(n \log n)$, dan pencarian kandidat pada tiap iterasi memanfaatkan struktur data terurut seperti balanced binary search tree atau dua pointer yang menelusuri ke arah BPM lebih tinggi dan lebih rendah dari lagu aktif, maka pencarian kandidat dengan biaya minimum pada tiap iterasi dapat dipercepat menjadi $O(\log n)$, sehingga kompleksitas waktu total dapat diturunkan menjadi:

$$T(n) = O(n \log n) + O(n) \times O(\log n) = O(n \log n)(6)$$

Optimasi ini relevan untuk diterapkan apabila ukuran koleksi lagu sangat besar, misalnya pada pustaka musik streaming yang memuat ribuan judul. Untuk kebutuhan makalah ini, implementasi referensi tetap menggunakan pendekatan pemindaian linear sederhana $O(n^2)$ karena ukuran dataset pengujian relatif kecil dan kejelasan logika algoritma lebih diutamakan untuk keperluan ilustrasi.

Dari aspek kompleksitas ruang, algoritma hanya memerlukan struktur tambahan untuk menyimpan himpunan R sebagai salinan kerja dari S , playlist P , dan himpunan kandidat C pada setiap iterasi, yang masing-masing berukuran paling banyak $O(n)$. Dengan demikian, kompleksitas ruang algoritma ini adalah $O(n)$, tanpa memerlukan struktur tabulasi tambahan sebagaimana lazim dijumpai pada pendekatan program dinamis.

IV. EKSPERIMEN DAN HASIL

A. Definisi Masalah Secara Formal

Untuk mengevaluasi algoritma greedy yang dirancang, digunakan satu set data fiktif berisi 15 lagu dengan judul, nama artis, BPM, dan durasi yang dibuat untuk keperluan simulasi pada makalah ini. Variasi BPM pada dataset sengaja dirancang agar sebagian lagu berada pada rentang target $[170, 180]$ dan sebagian lainnya berada jauh di luar rentang tersebut, sehingga kemampuan algoritma dalam menyaring dan mengurutkan kandidat yang valid dapat teruji secara representatif. Rincian dataset disajikan pada Tabel I.

TABEL I. DATASET 15 LAGU FIKTIF UNTUK SIMULASI

No.	Judul Lagu	Artis (fiktif)	BPM	Durasi (s)
1	Solar Drift	Nova Halycon	128	215
2	Iron Pulse	Vektra	174	198
3	Crimson Stride	Aldera Run	176	207

No.	Judul Lagu	Artis (fiktif)	BPM	Durasi (s)
4	Glasswalker	Mira Tone	182	192
5	Velocity Bloom	Kelta Sound	171	220
6	Echo Marathon	Ourison	168	233
7	Night Stamina	Dexel	179	201
8	Static Horizon	Verya	145	210
9	Pace Setter	Lunoff	173	195
10	Quiet Combustion	Halvis	177	224
11	Endorphin Run	Cassia Veld	158	188
12	Tempo Drift	Ranvik	175	213
13	Marrow Engine	Sten Oray	190	199
14	Asphalt Bloom	Idun Vask	180	206
15	Final Mile	Orelle	172	240

B. Skenario Pengujian

Skenario pengujian menetapkan rentang target cadence $L = 170$ dan $U = 180$ langkah per menit, dengan titik tengah $mid = 175$. Ambang batas toleransi transisi ditetapkan $\delta = 6$ BPM, dengan pertimbangan bahwa selisih tempo sebesar itu masih berada pada batas yang dapat ditoleransi oleh sistem motorik pelari untuk beradaptasi tanpa kehilangan ritme secara signifikan, mengacu pada rentang adaptasi cadence yang diamati pada penelitian sinkronisasi musik dan gerak lari [3].

C. Eksekusi Algoritma dan Hasil

Algoritma diterapkan terhadap dataset pada Tabel I dengan langkah-langkah berikut. Pada iterasi pertama, di antara seluruh lagu yang BPM-nya berada pada rentang $[170, 180]$, yaitu Iron Pulse, Crimson Stride, Glasswalker (tereliminasi karena 182 melebihi batas atas dan dipertimbangkan terpisah), Velocity Bloom, Night Stamina, Pace Setter, Quiet Combustion, Tempo Drift, Asphalt Bloom, dan Final Mile, algoritma memilih Tempo Drift dengan BPM 175 karena nilainya tepat sama dengan mid sehingga selisihnya nol, nilai minimum yang mungkin.

Selanjutnya algoritma bergerak secara bertahap menyusuri lagu-lagu dengan BPM yang berdekatan: dari Tempo Drift (175) menuju Iron Pulse (174), kemudian Pace Setter (173), Final Mile (172), dan Velocity Bloom (171), masing-masing dengan selisih transisi sebesar 1 BPM. Setelah mencapai Velocity Bloom, tidak ada lagi kandidat dengan BPM antara 165 dan 177 yang tersisa di sisi bawah, sehingga algoritma beralih arah dan memilih Crimson Stride (176), satu-satunya kandidat tersisa dengan selisih 5 BPM yang masih dalam batas toleransi $\delta = 6$. Proses berlanjut menuju Quiet Combustion (177, selisih 1), Night Stamina (179, selisih 2), dan akhirnya Asphalt Bloom (180, selisih 1). Pada titik ini, seluruh lagu yang tersisa di luar playlist memiliki BPM di luar rentang $[170, 180]$, sehingga himpunan kandidat valid menjadi kosong dan algoritma berhenti. Ringkasan urutan playlist akhir yang dihasilkan algoritma disajikan pada Tabel II.

TABEL II. PLAYLIST HASIL ALGORITMA GREEDY

Urutan	Judul Lagu Terpilih	BPM	Durasi (s)	Δ BPM
1	Tempo Drift	175	213	0
2	Iron Pulse	174	198	1
3	Pace Setter	173	195	1
4	Final Mile	172	240	1
5	Velocity Bloom	171	220	1
6	Crimson Stride	176	207	5
7	Quiet Combustion	177	224	1
8	Night Stamina	179	201	2
9	Asphalt Bloom	180	206	1

Dari proses eksekusi tersebut, algoritma berhasil menyusun seluruh sembilan lagu yang BPM-nya berada pada rentang target ke dalam satu rangkaian playlist tunggal yang kontinu, tanpa ada satu pun lagu valid yang tersisih akibat kendala toleransi transisi. Total durasi playlist yang dihasilkan adalah 1904 detik atau setara 31 menit 44 detik, dengan rata-rata selisih BPM antar lagu yang berurutan sebesar 1,62, jauh di bawah ambang toleransi yang ditetapkan.

D. Perbandingan dengan Baseline

Sebagai pembandingan, disimulasikan pula skenario baseline berupa pemutaran seluruh 15 lagu dalam urutan acak tanpa penyaringan rentang BPM maupun pertimbangan transisi, merepresentasikan kebiasaan umum mendengarkan musik secara shuffle tanpa kurasi. Pada baseline ini, seluruh 15 lagu diputar, namun hanya 9 di antaranya yang BPM-nya benar-benar berada pada rentang target, sedangkan 6 lagu lainnya, seperti Solar Drift (128 BPM) dan Marrow Engine (190 BPM), berpotensi mengganggu cadence pelari karena tempo yang jauh meleset dari target. Rata-rata selisih BPM antar lagu yang berurutan pada urutan acak tersebut tercatat sebesar 18,64, lebih dari sebelas kali lipat dibandingkan rata-rata transisi pada playlist hasil algoritma greedy. Ringkasan perbandingan disajikan pada Tabel III.

TABEL III. PERBANDINGAN GREEDY DENGAN BASELINE ACAK

Metrik	Greedy	Baseline Acak
Jumlah lagu terpilih	9 dari 15	15 dari 15
Lagu dalam rentang [170,180]	9 dari 9 (100%)	9 dari 15 (60%)
Rata-rata transisi BPM antar lagu	1,62	18,64
Total durasi playlist	31,73 menit	39,55 menit

Hasil perbandingan ini menegaskan kontribusi utama algoritma greedy yang diusulkan, yaitu kemampuannya menyaring kandidat yang relevan dengan target cadence sekaligus menyusun urutan transisi yang mulus, suatu hal yang tidak dapat dijamin oleh pemutaran acak meskipun jumlah lagu yang diputar lebih banyak.

E. Diskusi dan Keterbatasan

Meskipun algoritma greedy yang diusulkan berhasil menyertakan seluruh kandidat valid pada studi kasus dataset

ini, sifat myopic dari strategi greedy tetap berpotensi menimbulkan hasil yang tidak optimal secara global pada konfigurasi data tertentu. Sebagai ilustrasi, apabila pada suatu iterasi terdapat dua kandidat dengan selisih BPM yang sama terhadap lagu aktif, tetapi salah satu kandidat tersebut merupakan satu-satunya jembatan penghubung menuju klaster lagu lain yang lebih besar, algoritma yang hanya melihat biaya transisi langsung tanpa memandang struktur global dapat saja memilih kandidat yang secara lokal sama baiknya namun menjebak playlist pada jalan buntu lebih dini, sehingga jumlah total lagu yang berhasil dirangkai menjadi lebih sedikit dibandingkan apabila urutan pemilihan diatur secara berbeda. Karakteristik inilah yang membedakan permasalahan ini dari interval scheduling klasik, yang strategi greedy berdasarkan earliest finish time terbukti optimal secara global melalui exchange argument [2], sedangkan pada permasalahan penyusunan playlist berbasis minimisasi transisi BPM berurutan, pembuktian optimalitas global semacam itu pada umumnya tidak berlaku tanpa batasan struktur tambahan pada distribusi BPM dataset.

Keterbatasan lain dari pemodelan pada makalah ini adalah penyederhanaan bahwa satu ketukan musik dipetakan langsung ke satu langkah kaki, tanpa memperhitungkan kemungkinan pemetaan dua langkah per ketukan atau setengah ketukan per langkah yang juga lazim ditemui pada praktik lari dengan musik. Pemodelan ini juga belum memasukkan preferensi genre, energi lagu (intensitas, dinamika), maupun keselarasan fase ketukan terhadap hentakan kaki yang menurut penelitian terdahulu turut memengaruhi efektivitas sinkronisasi [5]. Pengembangan lebih lanjut yang memasukkan dimensi-dimensi tersebut berpotensi menghasilkan model yang lebih representatif terhadap kebutuhan nyata pelari.

V. KESIMPULAN

Makalah ini telah merancang dan menguji penerapan algoritma greedy untuk menyusun playlist lagu yang menjaga stabilitas cadence pelari jarak jauh pada rentang target BPM tertentu. Permasalahan dimodelkan secara formal sebagai pemilihan dan pengurutan subhimpunan lagu yang meminimalkan fungsi biaya transisi BPM antar lagu yang berurutan, dengan strategi greedy yang pada setiap iterasi memilih kandidat dengan biaya transisi minimum dari himpunan lagu yang masih tersedia dan memenuhi kendala rentang serta toleransi transisi.

Hasil simulasi terhadap dataset 15 lagu fiktif menunjukkan bahwa algoritma berhasil menyusun seluruh sembilan lagu yang berada pada rentang target ke dalam satu playlist tunggal dengan rata-rata transisi BPM sebesar 1,62, signifikan lebih rendah dibandingkan rata-rata transisi 18,64 pada baseline pengurutan acak terhadap dataset yang sama. Dari segi efisiensi komputasi, algoritma ini memiliki kompleksitas waktu $O(n^2)$ pada implementasi pemindaian linear sederhana, yang dapat diturunkan menjadi $O(n \log n)$ apabila digunakan struktur data terurut, serta kompleksitas ruang $O(n)$, sehingga sangat sesuai untuk diimplementasikan pada aplikasi pemutar musik berbasis perangkat bergerak dengan sumber daya komputasi terbatas.

Meskipun demikian, sifat myopic algoritma greedy tetap membuka kemungkinan solusi yang dihasilkan tidak optimal secara global pada konfigurasi dataset tertentu, sebagaimana telah dibahas pada bagian diskusi. Pengembangan lebih lanjut dapat diarahkan pada perancangan strategi greedy dengan kriteria pemilihan yang lebih cermat, misalnya dengan mempertimbangkan ketersediaan kandidat di masa depan (look-ahead), atau dengan menggabungkan pendekatan greedy sebagai solusi awal yang kemudian disempurnakan melalui teknik program dinamis maupun branch and bound untuk kasus dataset berukuran kecil hingga menengah, sehingga keseimbangan antara kualitas solusi dan efisiensi komputasi dapat lebih dioptimalkan.

REFERENCES

- [1] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 4th ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2022.
- [2] J. Kleinberg and E. Tardos, *Algorithm Design*. Boston, MA, USA: Pearson Addison-Wesley, 2006.
- [3] E. Van Dyck et al., "Spontaneous Entrainment of Running Cadence to Music Tempo," *Sports Medicine - Open*, vol. 1, no. 15, 2015.
- [4] R. J. Bood, M. Nijssen, J. Van Der Kamp, and M. Roerdink, "The Power of Auditory-Motor Synchronization in Sports: Enhancing Running Performance by Coupling Cadence with the Right Beats," *PLOS ONE*, vol. 8, no. 8, e70758, 2013.
- [5] J. Buhmann, F. Desmet, B. Moens, E. Van Dyck, and M. Leman, "Optimizing beat synchronized running to music," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 12, e0208702, 2018.
- [6] J. Baumgartner, R. Gusmer, J. Hollman, and J. T. Finnoff, "Increased Stride-Rate in Runners Following an Independent Retraining Program: A Randomized Controlled Trial," *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, vol. 29, no. 11, pp. 1789–1796, 2019.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 19 Juni 2026



Muhammad Azzam Robbani
18223025