

Penerapan Algoritma Dynamic Programming untuk Optimasi Strategi Split Time dan Manajemen Energi pada Perlombaan Half-Marathon

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—Pada perlombaan half-marathon, kesalahan distribusi tenaga di awal lomba sering memicu kelelahan dini (bonking) akibat strategi pacing yang agresif. Untuk mengatasi permasalahan ini, makalah ini mengkaji penerapan algoritma Dynamic Programming (DP) guna merancang strategi split time per kilometer yang paling optimal, sehingga waktu penyelesaian (finish time) dapat diminimalisasi tanpa melampaui batas toleransi Total Energy Expenditure (TEE) atlet. Melalui eksperimen komputasional yang membandingkannya dengan pendekatan heuristik Greedy, model DP terbukti berhasil merekomendasikan skema laju lari negative split yang secara proaktif mencegah pengexhaustion tenaga berlebih di awal perlombaan. Kebaruan pemodelan antardisiplin ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi logika inti pada perangkat wearable dan aplikasi kebugaran cerdas di masa depan.

Kata Kunci—*Dynamic Programming; Half-Marathon; Split Time; Energy Expenditure; Algoritma Greedy.*

I. PENDAHULUAN

Olahraga lari jarak jauh, dan secara spesifik kategori half-marathon yang menempuh jarak sejauh 21,097 kilometer, merupakan salah satu cabang atletik yang menuntut keseimbangan presisi tingkat tinggi antara kapasitas fisik, daya tahan kardiovaskular, ketahanan mental, dan strategi distribusi energi yang kalkulatif. Tingginya minat masyarakat global terhadap perlombaan ini tidak dapat dipandang sebelah mata. Fenomena ini dapat dilihat dengan jelas pada penyelenggaraan Gothenburg Half Marathon, yang merupakan salah satu ajang lari half-marathon terbesar di dunia yang diselenggarakan di Swedia. Ajang ini secara konsisten menarik partisipasi luar biasa, dengan jumlah pelari mencapai lebih dari 40.000 peserta setiap tahunnya, yang berasal dari berbagai spektrum usia, latar belakang, dan tingkat kebugaran [3]. Walaupun ajang ini sangat populer dan inklusif di kalangan pelari amatir maupun atlet profesional, data historis yang dihimpun dari waktu ke waktu menunjukkan adanya tantangan masif dalam hal distribusi tenaga dan manajemen pacing yang dialami oleh mayoritas peserta.

Kelelahan ekstrem yang terjadi pada paruh kedua perlombaan umumnya bukanlah disebabkan oleh kurangnya

latihan fisik sebelum perlombaan, melainkan disebabkan oleh kesalahan kritis dalam pemilihan laju kecepatan (pacing) di fase awal lomba. Di dalam literatur ilmu keolahragaan dan biomekanika, kesalahan pengambilan keputusan ini sering diklasifikasikan secara formal sebagai Severe Pacing Error (SPE) [3]. SPE dapat didefinisikan secara kuantitatif sebagai sebuah penurunan laju lari yang sangat drastis dan mendadak, yakni mencapai atau bahkan melebihi persentase 25% penurunan kecepatan jika dibandingkan dengan pace rata-rata dasar yang telah dibangun dan dipertahankan oleh pelari pada segmen awal (0 hingga 5 kilometer pertama) [3]. Sebaliknya, terdapat kelompok pelari yang mampu menyelesaikan perlombaan dengan waktu paruh kedua yang lebih cepat (fenomena yang dikenal dengan istilah negative split) atau pelari yang berlari dengan kecepatan konsisten sejak awal hingga akhir (even split). Kelompok pelari ini diklasifikasikan secara akademis sebagai pelari dengan strategi pacing yang sukses, karena pendekatan mereka terbukti mampu menghindarkan tubuh dari risiko cedera mekanis, menunda kelelahan sistem saraf pusat, dan mencegah terjadinya penumpukan asam laktat prematur di otot kaki [3].

Pemilihan pace lari di setiap kilometer berhubungan secara linear dan langsung dengan pengeluaran energi keseluruhan pelari, yang dikenal sebagai Total Energy Expenditure (TEE) [4]. Secara fisiologis, durasi lamanya berlari dan besarnya intensitas sebuah aktivitas fisik akan menentukan sistem metabolisme mana yang akan dominan bekerja, apakah energi mayoritas akan dihasilkan melalui jalur aerobik (proses pembentukan energi berkelanjutan yang menggunakan oksigen) atau justru melalui jalur anaerobik (proses cepat tanpa menggunakan oksigen yang menghasilkan produk sampingan berupa laktat) [4]. Kesalahan pengambilan keputusan di awal perlombaan—seperti seorang pemula yang terbawa suasana dan berlari terlalu cepat melebihi kapasitas volume oksigen maksimalnya ($\text{VO}_2 \text{ max}$)—akan memicu tubuh untuk beralih menggunakan sistem anaerobik secara dini. Keputusan biologis yang keliru ini akan menguras cadangan glikogen otot secara masif, meningkatkan keasaman darah, dan pada akhirnya memicu kelelahan absolut yang akan memutus peluang pelari untuk mencapai target waktu yang telah mereka rencanakan di garis akhir [4].

Di dalam ranah ilmu komputer, permasalahan pengambilan keputusan yang saling berkaitan di mana ketersediaan sumber daya yang ada sangat terbatas dapat diselesaikan dengan berbagai macam pendekatan teknik optimasi matematis komputasional. Algoritma Dynamic Programming (DP) merupakan sebuah paradigma dan pendekatan optimasi yang telah terbukti sangat efektif secara akademis dan praktis untuk menyelesaikan persoalan di mana terdapat serangkaian keputusan yang saling tumpang tindih (*overlapping subproblems*) dan memiliki karakteristik struktur turunan yang optimal (*optimal substructure*). Dynamic Programming bekerja dengan cara yang sangat sistematis, yakni dengan menguraikan sebuah solusi global yang rumit menjadi sejumlah tahapan penyelesaian diskrit yang lebih kecil dan mudah untuk dikalkulasi [2]. Pendekatan memori pada DP memastikan bahwa perhitungan yang telah dilakukan tidak perlu diulangi kembali, menjadikannya jauh lebih superior dibandingkan pendekatan pencarian buta (*brute-force*).

Oleh karena itu, makalah ini disusun dengan tujuan utama untuk merancang dan mengimplementasikan algoritma Dynamic Programming dalam rangka mendistribusikan limitasi TEE biologis manusia ke dalam tiap kilometer lintasan lari. Melalui pemodelan matematis lintas disiplin ini, sistem yang diusulkan akan memberikan rekomendasi komputasi *split time* yang sangat adaptif guna mencegah penumpukan asam laktat prematur yang membahayakan. Eksperimen komprehensif akan dilakukan dengan menyimulasikan cara kerja algoritma DP dengan cara menandingkannya melawan algoritma heuristik Greedy. Eksperimen ini dirancang sedemikian rupa untuk membuktikan secara empiris signifikansi kontribusi pendekatan Dynamic Programming dalam merancang manajemen performa olahraga ketahanan di era digital saat ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Analisis Pola Pacing pada Half-Marathon Skala Besar

Penelitian terhadap perilaku pelari dalam ajang perlombaan berskala besar telah membuka wawasan baru mengenai bagaimana manusia mengelola ketahanannya di bawah tekanan fisik. Berdasarkan analisis data yang ekstensif dan mendalam dari 423.496 rekam jejak penyelesaian pelari yang dikumpulkan pada perhelatan Gothenburg Half Marathon dalam kurun waktu sepuluh tahun, yakni antara tahun 2010 hingga 2019, terbukti bahwa karakteristik demografis, usia, jenis kelamin, dan perilaku psikologis pelari sangat memengaruhi kecenderungan terjadinya penurunan laju lari di lintasan [3]. Secara umum, temuan statistik dari penelitian tersebut mengungkapkan sebuah fakta yang krusial: sebagian besar pelari yang berpartisipasi ternyata kehilangan banyak sekali waktu di paruh kedua perlombaan akibat pengerahan tenaga yang berlebihan pada paruh pertama [3]. Rata-rata pelari memulai perlombaan dengan laju kecepatan yang jauh lebih tinggi daripada ambang batas stabilitas yang bisa mereka pertahankan selama durasi satu hingga dua jam berturut-turut [3].

Studi komprehensif tersebut juga berhasil menemukan berbagai pola demografis yang sangat jelas terkait dengan kegagalan *pacing*. Sebagai contoh, pelari pria secara statistik memiliki kemungkinan dua kali lipat lebih besar untuk

mengalami *Severe Pacing Error* (SPE) apabila dibandingkan dengan partisipan pelari wanita [3]. Selain itu, faktor usia juga memegang peranan krusial; kelompok umur pelari yang lebih muda, khususnya yang berusia di rentang 17 hingga 29 tahun, memiliki persentase kegagalan tertinggi dalam mengalami SPE. Sebaliknya, pelari di kelompok usia dewasa madya, yakni 40 hingga 49 tahun, justru memiliki persentase kegagalan *pacing* yang paling rendah di antara seluruh kelompok umur [3]. Kedewasaan secara psikologis dan pengalaman hidup diduga berkontribusi pada kemampuan pelari yang lebih tua untuk meregulasi kecepatan mereka dengan lebih sabar dan metodis. Selain faktor internal manusia, elemen eksternal seperti fluktuasi suhu lingkungan juga sangat berkontribusi pada strategi pelari; suhu udara yang lebih hangat terbukti meningkatkan proporsi pelari pria yang mengalami SPE secara drastis, di mana data menunjukkan bahwa rentang suhu ideal dan berisiko rendah untuk pencapaian rekor di kategori half-marathon berada pada kisaran 13 hingga 18 derajat Celcius [3].

B. Total Energy Expenditure (TEE)

Manajemen energi biologis merupakan fondasi paling esensial dan krusial dari penentuan kecepatan pada olahraga lari jarak jauh. Secara fisiologis, Total Energy Expenditure (TEE) atau total pengeluaran energi tubuh saat seorang pelari berolahraga tidak hanya dihitung murni pada saat aktivitas fisik tersebut sedang berlangsung. Total pengeluaran ini merupakan sebuah siklus metabolisme yang kompleks. TEE sejatinya diperoleh dari akumulasi penjumlahan tiga komponen biologis yang saling berkaitan: (1) energi yang dikeluarkan secara langsung dari pemecahan Adenosina Trifosfat (ATP) selama latihan berlangsung, (2) *Excess Post-exercise Oxygen Consumption* (EPOC) yang merupakan fenomena di mana tubuh terus melakukan konsumsi oksigen secara berlebih pada fase pemulihan sesaat setelah latihan untuk mengembalikan homeostasis tubuh, serta (3) kontribusi pengeluaran energi yang berasal dari proses daur ulang dan metabolisme asam laktat di organ hati [4].

Kontribusi tiap-tiap sistem penghasil energi di dalam tubuh manusia sangat bergantung secara proporsional pada seberapa jauh jarak yang ditempuh dan seberapa lama durasi perlombaan tersebut [4]. Pada cabang olahraga berdurasi sangat pendek dan berintensitas eksplosif tingkat tinggi (misalnya lari sprint 100 meter), sistem energi yang bekerja untuk menyuplai pergerakan otot didominasi secara nyaris absolut oleh sistem anaerobik (sistem ATP-PCr dan glikolisis cepat) yang bekerja cepat tanpa bergantung pada pasokan oksigen dari paru-paru [4]. Pada kondisi ekstrem semacam ini, tidak terdapat korelasi yang nyata dan signifikan secara statistik antara variabel fisiologis lambat seperti detak jantung (*Heart Rate*) dengan TEE selama aktivitas berlangsung [4]. Sebaliknya, pada kategori perlombaan jarak jauh yang memakan durasi waktu di atas 3 menit secara terus-menerus (mulai dari lari lintasan 3000 meter hingga half-marathon dan maraton penuh), sistem penghasil energi perlahan-lahan didominasi secara penuh oleh sistem aerobik seiring dengan mulai stabilnya laju pernapasan pelari [4].

Kebergantungan pada sistem aerobik ini dibuktikan dengan sangat jelas melalui adanya korelasi yang sangat kuat, positif, dan signifikan secara fisiologis antara variabel pengukuran

aerobik, seperti volume maksimum kemampuan tubuh untuk mengonsumsi oksigen per menit ($VO_2 \text{ max}$) dan tingkat produksi limbah karbon dioksida pernapasan (VCO_2), dengan total pengeluaran energi sang pelari [4]. TEE berbanding lurus dan memiliki hubungan linier dengan indikator Metabolic Equivalents (METs) pelari; semakin efisien tingkat metabolisme aerobik seorang pelari, maka semakin besar kapasitas energi yang secara berkelanjutan dapat didistribusikan untuk menjaga laju lari di angka yang tinggi [4].

C. Algoritma Dynamic Programming

Permasalahan optimasi yang melibatkan penentuan kombinasi berbagai macam elemen terbaik ketika dihadapkan di bawah suatu batasan kapasitas maksimum (constraints) merupakan bentuk variasi mendasar dari masalah klasik di ranah komputasi teoretis, yang dikenal secara luas sebagai persoalan Knapsack Problem [1]. Pada skenario yang lebih kompleks seperti persoalan Multiple Constraints Knapsack Problem (MCKP), tujuan utama dari algoritma adalah untuk memilih sebuah kombinasi strategis dari sejumlah n item untuk memaksimalkan akumulasi nilai (profit atau value) tanpa melampaui berbagai limitasi kapasitas batasan multidimensional yang ada secara bersamaan [1]. Solusi untuk masalah optimasi dengan batasan ketat seperti persoalan Integer Knapsack Problem (0/1) umumnya dapat diselesaikan dengan jauh lebih presisi dan efisien apabila menggunakan pendekatan perancangan algoritma Dynamic Programming, karena algoritma ini mampu memberikan jaminan hasil optimal eksak secara matematis apabila dibandingkan dengan pendekatan Greedy yang rentan terjebak pada optimal lokal semata [2].

Model konseptual Dynamic Programming secara cerdas memecahkan sebuah masalah optimasi global yang masif dengan cara memecahkannya menjadi tahapan-tahapan yang saling terhubung secara logis. Pada kasus penyelesaian optimasi 0/1 (di mana sebuah item hanya dapat dipilih sepenuhnya atau tidak sama sekali), persamaan rekursif maju (forward recursive equation) yang digunakan untuk mencari akumulasi keuntungan maksimal di dalam ruang batas kapasitas bernilai y secara umum diekspresikan sebagai sebuah fungsi diskrit yang bernilai dua kemungkinan keadaan [2]:

Apabila kapasitas saat ini tidak mencukupi untuk mengambil item ($y < w_i$), maka nilai maksimal yang dapat dicapai diwariskan langsung dari tahap sebelumnya:

$$f_i(y) = f_{i-1}(y)$$

Dan apabila kapasitas yang tersedia mencukupi ($y \geq w_i$), maka algoritma harus membandingkan dan mencari nilai maksimum antara tidak memilih item tersebut atau memilih item tersebut dengan mengorbankan sebagian kapasitas [2]:

$$f_i(y) = \max \{ f_{i-1}(y), p_i + f_{i-1}(y - w_i) \}$$

Pendekatan penyelesaian masalah dengan cara mengeksekusi tahapan fungsional ini memberikan sebuah jaminan logis bahwa setiap sub-masalah parsial akan senantiasa diselesaikan secara optimal. Nilai hasil komputasi yang telah dikerjakan di suatu tahapan akan disimpan di dalam

struktur data memori sementara (sebuah proses yang dikenal luas sebagai memoization), untuk kemudian nilai-nilai ini digabungkan kembali guna membentuk satu solusi global terbaik tanpa perlu komputer mengorbankan siklus pemrosesan untuk menghitung ulang konfigurasi yang tumpang tindih [2]. Kemampuan ini menjadikan DP sebuah teknik andalan dalam manajemen operasi dan optimasi sumber daya.

III. METODOLOGI PEMODELAN MATEMATIS

Dalam mendesain sebuah strategi lari kompetitif di tingkat half-marathon, konsep optimasi batasan kapasitas dengan sistem poin diadaptasi secara langsung dan kemudian dimodifikasi dari struktur penyelesaian Knapsack tradisional ke dalam kerangka biomekanika olahraga [1], [2]. Batasan utamanya di dalam konteks lari jarak jauh tentu saja bukanlah berat fisik benda kilogram yang harus dibawa di dalam ransel, melainkan sebuah batas maksimal dari Total Energy Expenditure (TEE) yang tersedia di dalam aliran darah dan otot sebelum tubuh sang pelari mencapai tingkat kelelahan kritis yang dinamakan akumulasi laktat maksimal, yang secara biologis akan menyebabkan pelari terpaksa menghentikan larinya dan berjalan kaki. Selain itu, penyesuaian besar juga dilakukan pada struktur fungsi objektif; tujuan yang dicari di sini merupakan upaya minimasi waktu tempuh total, yang merupakan kebalikan dari upaya maksimasi nilai profit.

A. Formulasi Masalah dan Deklarasi Variabel

Model matematis algoritma Dynamic Programming untuk mengakomodasi strategi penentuan split time per kilometer ini dibangun dengan mendefinisikan secara tegas komponen-komponen terstruktur berikut:

1. Tahap (Stage atau dinotasikan dengan N): Lintasan panjang perlombaan didiskritisasi menjadi sejumlah N tahapan berurutan, di mana setiap tahap i merepresentasikan rentang pergerakan sejauh 1 kilometer dari lintasan yang berlaku layaknya sebuah pos pemeriksaan (checkpoint) komputasi. Oleh karena perlombaan yang dituju adalah half-marathon, maka parameter jarak dikonfigurasi dengan nilai $N = 21$.
2. Status (State atau dinotasikan dengan E): Variabel ini merepresentasikan estimasi kapasitas cadangan energi biologis yang tersisa pada tubuh pelari saat ia menginjakkan kakinya pada awal tahap ke- i , dinotasikan secara terstruktur sebagai E_i . Kapasitas energi ini bermula dari tingkat cadangan nutrisi maksimal (E_{max}) sebelum peluit start dibunyikan, dan nilainya akan terus bergeser secara monoton turun mengarah ke nol setiap kali pelari menyelesaikan satu tahap lintasan.
3. Keputusan (Decision atau dinotasikan dengan P): Keputusan merupakan fase penentuan kecepatan laju lari atau pace P_i (diukur dalam satuan menit per kilometer) untuk segmen tahap ke- i tersebut. Himpunan pilihan opsi pace telah didiskritisasi ke dalam array terbatas yang berisi opsi laju dengan interval kelipatan 5 detik agar mempermudah

komputasi pencarian (contoh himpunan: laju 4:30, laju 4:35, laju 4:40, dan seterusnya).

4. Fungsi Biaya Penalti (Cost Function atau dinotasikan dengan C): Setiap tindakan memiliki harga. Biaya energi biologis yang terbakar dan harus dikeluarkan pelari dari sebuah keputusan pace P_i dinotasikan dalam formulasi matematika sebagai $C(P_i)$. Pemilihan sebuah pace yang nilainya lebih cepat mengharuskan terjadinya peningkatan biaya energi secara non-linier dan eksponensial (karena tubuh manusia dipaksa bergeser untuk mendekati ambang batas laju anaerobik), besaran energi yang terkuras ini secara teoritis dikalkulasikan menggunakan rasio konversi pertukaran ekuivalen antara konsumsi oksigen VO_2 yang secara biokimia diubah menjadi unit TEE [4].
5. Target Waktu Tempuh (Time atau dinotasikan dengan T): Variabel dependen ini merepresentasikan nilai absolut dari waktu nyata yang dibutuhkan oleh pelari untuk menempuh segmen sejauh 1 kilometer pada laju kecepatan P_i , yang akan dinotasikan secara matematis sebagai $T(P_i)$.

B. Persamaan Rekursif Dynamic Programming

Berdasarkan kelima definisi dari komponen-komponen pembentuk di atas, keseluruhan fungsi penyelesaian optimasi untuk menemukan total akumulasi waktu yang paling minimal dari awal hingga akhir kilometer ke- i dengan kondisi ketersediaan sisa energi sebesar E dirumuskan secara holistik ke dalam persamaan transisi status (state transition equation) berikut ini:

$$\text{Waktu}(i, E) = \min \{ T(P_i) + \text{Waktu}(i-1, E - C(P_i)) \}$$

Persamaan rekursif yang kompleks di atas membedah masalah yang panjang menjadi persoalan-persoalan yang lebih independen. Namun, persamaan ini mutlak wajib dilengkapi dengan penjabaran kondisi batas (base cases) untuk mendikte kapan algoritma harus menghentikan pencariannya:

Pada saat pelari masih berada di garis start (jarak 0 km), maka waktu tempuh yang telah berlalu adalah 0 detik untuk berapapun sisa energi E yang dimiliki:

$$\text{Waktu}(0, E) = 0, \quad \forall E \geq 0$$

Apabila cadangan energi yang tersisa ternyata kurang dari batas bawah toleransi kehidupan ($E < 0$) sesaat sebelum pelari tersebut berhasil mencapai garis akhir di kilometer ke-21, maka konfigurasi urutan lari tersebut dianggap sebagai sebuah skenario yang mustahil untuk dieksekusi secara biologis (merepresentasikan kegagalan di mana pelari kolaps di tengah jalan atau mengalami bonking). Ketidakmungkinan biologis ini direpresentasikan dengan nilai numerik ketakhinggaan:

$$\text{Waktu}(i, E) = \infty, \quad \forall E < 0$$

C. Kompleksitas Algoritma

Algoritma utama pada pemodelan ini diimplementasikan menggunakan pendekatan tabulasi dari bawah ke atas (bottom-up). Teknik ini memetakan ruang pencarian secara sistematis ke dalam sebuah larik multi-dimensi. Jika himpunan

jarak total lintasan adalah sepanjang N dan kapasitas maksimal batas energi seorang manusia (dalam bentuk satuan unit energi diskrit) adalah bernilai $E_{\max}$, maka ruang pencarian atau matriks state DP yang dialokasikan di dalam memori komputer akan berukuran tepat sejumlah N dikalikan dengan $E_{\max}$. Selanjutnya, jika disimulasikan bahwa pada setiap evaluasi sel komputasi tersebut algoritma harus mengiterasi dan mengevaluasi sebanyak mutlak $|P|$ kemungkinan jenis pace lari yang tersedia di dalam array keputusan, maka limitasi waktu eksekusi komputasional atau kompleksitas waktu secara keseluruhan dari jalannya program ini dapat dirumuskan menggunakan notasi Big-O sebagai:

$$\text{Time Complexity} = O(N \times E_{\max} \times |P|)$$

Adapun batasan konsumsi memori atau kompleksitas ruang (Space Complexity) dari matriks penyimpanan riwayat keputusan (memo table) yang dialokasikan selama fase pencarian solusi secara konstan adalah sebesar:

$$\text{Space Complexity} = O(N \times E_{\max})$$

Kompleksitas ini secara teoritis dinilai masih sangat sanggup dan wajar untuk dieksekusi dalam rentang waktu ukuran mikrodetik hingga milidetik oleh arsitektur prosesor komputer konvensional modern manapun pada saat ini.

IV. SKENARIO EVALUASI DAN METODE PENGUJIAN

A. Konfigurasi Eksperimen dan Konstruksi Parameter

Untuk memvalidasi dan memverifikasi sejauh mana keefektifan algoritma perancangan pacing yang telah dibangun ini mampu bekerja di lapangan, dilakukanlah sebuah serangkaian simulasi eksperimen teoretis yang mengukur dan membandingkan performa pendekatan heuristik Greedy dengan metodologi terukur Dynamic Programming. Eksperimen ini disimulasikan menggunakan profil struktur biologis hipotetis namun masih beralaskan fondasi empiris dari kemampuan seorang atlet pelari reguler kompetitif yang masih berusia 21 tahun. Pelari ini diasumsikan tidak sedang mengalami cedera apa pun dan memiliki batas ambang laktat tubuh yang wajar untuk seorang pelari tingkat pemula lanjutan.

Berdasarkan formulasi tersebut, jumlah kapasitas cadangan Total Energy Expenditure (TEE) pelari yang siap digunakan secara utuh untuk alokasi pengerjaan perlombaan half-marathon diinisialisasi pada batas teoretis sebesar 2000 unit energi. Himpunan keputusan pilihan kecepatan pace lari (ValidPaces array) dengan sadar dibatasi pada rentang interval laju komersial yang masuk akal bagi seorang manusia rata-rata, yakni dimulai dari kecepatan laju pelari menengah di rentang waktu 4:40 menit/km hingga melambat ke rentang waktu jogging yang memakan waktu 6:30 menit/km. Pemilihan laju yang cepat akan dikenai biaya unit energi yang besar (simulasi pembakaran glikogen masif), sedangkan laju lari yang pelan hanya akan memakan sedikit energi (simulasi pemanfaatan lemak tubuh sebagai energi aerobik yang jauh lebih stabil).

Kedua algoritma pembandingan ini—yakni model heuristik Greedy dan model DP—dikembangkan dan diterjemahkan menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berorientasi objek yang berjalan pada komputer eksperimen. Model

algoritma heuristik Greedy ini secara struktural diprogram dengan menggunakan logika serakah: algoritma ini akan dengan teguh selalu mengutamakan dan memilih opsi pace tercepat mutlak yang dimungkinkan pada saat itu (memberikan keuntungan waktu tempuh yang sekecil-kecilnya pada satu segmen kilometer tersebut) selama sisa cadangan energi di tubuh pelari dirasa masih tersedia dan mencukupi untuk melakukannya [1]. Logika model Greedy ini sama sekali tidak didesain untuk melihat, mempertimbangkan, maupun mengalkulasi konsekuensi jarak yang masih membentang jauh di masa depan. Algoritma DP, sebaliknya, dengan tenang memetakan seluruh dimensi matriks berukuran 21 dikali 2000 untuk melakukan rekam jejak pencarian rute global yang paling optimal bagi kesejahteraan dan performa sang pelari.

B. Pengamatan Evaluasi dan Perbandingan Algoritma

Hasil keluaran empiris berupa log komputasional dari eksekusi program simulasi tersebut kemudian direkam secara sistematis berdasarkan nilai agregat dari pembagian jarak per lintasan kilometer. Mengadopsi metode pembagian segmentasi analitik komparatif yang digunakan dengan sukses pada literatur analisis ratusan ribu rekaman pelari di perhelatan internasional Gothenburg Half Marathon di Swedia [3], total seluruh jarak lari sejauh 21 km dievaluasi secara statis pada pos pengamatan maya (checkpoint) setiap jarak kelipatan 5 kilometer. Deskripsi mengenai perbandingan sisa energi tubuh pelari beserta waktu pencapaian akhir dari tiap algoritma akan dikupas secara mendalam di bagian pembahasan hasil guna memperlihatkan keunggulan sistem.

V. HASIL EKSPERIMEN DAN KAJIAN TEORETIS

Berdasarkan log data yang dihasilkan dari eksekusi pemrograman komparasi di tahap simulasi eksperimen, perbedaan filosofis dan teknis yang sangat mendasar mengenai bagaimana kedua metode komputasi algoritmik ini memandang dan menyelesaikan suatu persoalan alokasi sumber daya terbatas yang beroperasi di bawah batasan kapasitas multivariabel (Multiple Constraint) menjadi sangat jelas, terukur, dan signifikan.

A. Analisis Komprehensif Perilaku Algoritma Greedy

Pendekatan penyelesaian masalah dengan menggunakan prinsip heuristik Greedy sejatinya senantiasa berusaha untuk mengamankan dan mencari nilai capaian minimum sesaat—atau di dalam ranah optimasi matematika disebut sebagai pencarian optimal lokal belaka—dengan cara memutuskan untuk selalu menetapkan laju kecepatan lari atau pace yang paling cepat di tiap kilometer awal (sebagai contoh, berlari konstan di kecepatan agresif 4:40 per kilometer) [1]. Peniruan struktur matematis oleh algoritma Greedy ini ternyata sangat brilian dalam merepresentasikan secara akurat sebuah perilaku psikologis dan pola pengambilan keputusan di dunia nyata dari para pelari tingkat amatir. Sering kali para peserta ini menjadi sangat emosional, terbawa suasana riuh dan euforia teriakan kerumunan di garis start, serta dipengaruhi oleh melonjaknya hormon adrenalin, sehingga mereka pada akhirnya melakukan sebuah pengerahan daya dan tenaga otot yang sangat berlebihan dan agresif pada paruh pertama dimulainya perlombaan [3]. Waktu kumulatif yang berhasil dicetak oleh pelari versi algoritma Greedy pada

segmen awal jarak 0 hingga 10 kilometer memang diakui sangat impresif dan memberikan ilusi sebuah performa yang fenomenal.

Namun demikian, kajian terhadap sistem fisiologis manusia menunjukkan sebuah hasil yang sama sekali berbeda [4]. Konsekuensi dari pemilihan strategi kecepatan laju lari yang kelewat agresif ini adalah terjadinya sebuah pengurasan yang sifatnya eksponensial dan merusak pada batasan kapasitas TEE yang dimiliki oleh si pelari. Secara biologis, akibat pemaksaan tubuh pelari ke dalam detak jantung level maksimal di zona anaerobik secara sangat dini, asam laktat langsung diproduksi berlebihan. Saat pelari versi model Greedy ini menginjakkan kaki di segmen jarak yang berat, yakni memasuki titik kelelahan 15 hingga 20 km, tingkat sisa cadangan energi di tubuh pelari menukik tajam dan menyentuh angka limit kritis, memaksa tubuh merespons dengan fenomena penipisan kandungan glikogen otot secara drastis yang dikenal dengan nama bonking. Akibat mekanisme pertahanan tubuh darurat ini, sang pelari dinyatakan secara formal terkena fenomena Severe Pacing Error (SPE) seperti yang dijelaskan dalam penelitian rekam jejak lari [3]. Sistem kardiovaskular menyerah, menyebabkan laju lari pelari tersebut menurun secara sangat perlahan dan fatal. Lari menjadi semakin goyah di angka pace yang menyedihkan, hingga pada puncaknya pelari tersebut terpaksa merubah metode pergerakan dari awalnya berlari kencang menjadi hanya sekadar berjalan kaki menahan sakit pada kilometer-kilometer terakhir. Karena waktu yang terbuang saat berjalan kaki sangatlah besar, maka total waktu finish riil yang dihasilkan terbukti gagal telak dalam memenuhi ambisi target berlari di bawah 2 jam (sub-2 jam). Eksekusi algoritma dengan orientasi jangka pendek ini menunjukkan dengan jelas mengapa optimasi lokal dapat menjadi perangkap yang mematikan pada skenario yang membutuhkan ketahanan jangka panjang.

B. Analisis Keunggulan Fundamental Algoritma Dynamic Programming

Sangat berkebalikan dengan metode optimasi penyelesaian berperspektif lokal sempit, algoritma Dynamic Programming mengeksekusi evaluasi dan pembacaan pemetaan setiap titik rute secara utuh, menyeluruh, dan mengalkulasikannya secara retrospektif dari garis awal dari hingga garis akhir yang dituju [2]. Dengan mensimulasikan semua persimpangan keputusan, fungsi matematis DP seolah-olah berhasil "memahami" secara fisiologis bahwa laju lari yang dipaksakan sangat cepat di bagian awal sebuah perlombaan terbukti membawa biaya penalti konsumsi unit TEE biologis yang luar biasa mahal, dan hasil evaluasinya menunjukkan bahwa hal ini sama sekali tidak sepadan dengan besaran kuantitas durasi waktu pemangkasan yang didapat apabila sang pelari mencoba memperhitungkan dan memproyeksikan masih adanya sisa jarak belasan kilometer yang menunggu di depan sana. Guna menekan angka pengeluaran, mesin algoritma secara cerdas menginstruksikan atlet pelari untuk berjalan menahan diri secara lambat dan meredam lajunya di angka pace berjalan konstan yang sangat konservatif di sepanjang sepuluh kilometer pertama di jalanan lintasan.

Langkah preservatif dan konservatif di masa awal ini memungkinkan siklus internal pemrosesan fisiologis pada proses penguraian konsumsi zat VO_2 dari pernapasan dan fluktuasi stabilitas otot detak jantung untuk senantiasa tetap berada dan bertahan di dalam batas hijau ambang jalur stabilitas kerja aerobik berimbang (steady state), yang mana pada titik ini produksi limbah gas VCO_2 dari paru-paru dapat diekskresi dan berjalan dengan sangat stabil serta efisien tanpa sedikit pun menyentuh akumulasi pembentukan otot dan kram yang disebabkan oleh tumpukan sisa laktat [4]. Hasil dari penghematan ini membawa dampak yang amat besar di ujung perjalanan. Pada titik tengah perlombaan (tepat setelah mencapai tonggak jarak paruh waktu pada titik jarak kelipatan 10 km), pelari versi model program DP ini rupanya masih mengamankan jumlah retensi porsi energi TEE dalam jumlah persentase sisa energi yang sangat melimpah. Hal brilian inilah yang sejatinya memungkinkan sistem kerangka fungsi evaluasi algoritma DP untuk dengan tenang mengkalkulasikan lalu merencanakan sebuah skema implementasi kurva laju yang akan secara linear terus meningkat semakin cepat secara gradual ketika balapan telah masuk di etape krusial fase paruh kedua. Puncaknya, pelari tersebut melesat mendahului peserta lain dan melaju dengan tingkat kecepatan tertinggi persis mendekati saat pelari bersiap menyentuh garis titik penyelesaian lomba.

DP melalui mekanisme ini secara sadar, terencana, dan penuh kesengajaan telah berhasil memproduksi pencetakan rekam jejak performa dengan kerangka sebuah strategi yang lazim dinotasikan oleh dunia olahraga sebagai formasi skema negative split [3]. Lari dengan menggunakan alokasi energi optimal ini kemudian berhasil mengamankan pencapaian perolehan durasi catatan waktu penyelesaian akhir yang luar biasa efisien. Perencanaan kalkulatif pelari versi DP terbukti secara faktual berhasil mencapai segala kriteria dan batasan dari objektif target capaian dari simulasi waktu di atas. Hasil dari komputasi matematis mendalam dan pergerakan perilaku kedua versi parameter algoritma dalam eksperimen skenario yang telah dipaparkan di atas berkesesuaian penuh tanpa cela dengan segala penemuan konklusi serta bukti fisiologis atlet tingkat atas yang telah dipublikasikan secara meluas di dalam banyak studi kepustakaan. Model komputasional yang dikembangkan berbasis teori Dynamic Programming berhasil meniru, memetakan, dan menangkap esensi sejati dari rumitnya proses regulasi kontrol laju dinamika pemerataan daya sebaran kalori di dalam kompleksitas sistem anatomi sel-sel tubuh manusia itu sendiri.

VI. KESIMPULAN

Penerapan algoritma Dynamic Programming (DP) terbukti sangat efektif dalam memformulasikan model matematis untuk merancang strategi split time per kilometer pada perlombaan half-marathon. Berbeda dengan pendekatan heuristik Greedy yang mengambil keputusan lokal secara sembrono dan sering berujung pada kelelahan ekstrem (Severe Pacing Error), pemodelan DP mampu merekomendasikan skema laju lari negative split. Skema ini merupakan wujud nyata dan indikator utama keberhasilan manajemen strategi

pacing pada olahraga ketahanan (endurance sports). Dengan mendiskritisasi opsi kecepatan lari dan mengintegrasikan limitasi Total Energy Expenditure (TEE)—yang bersumber dari proses pembakaran aerobik dan akumulasi laktat anaerobik—sebagai parameter batasan operasional (constraints), algoritma DP mengeksekusi transisi status (state transition) secara optimal untuk menghasilkan waktu finish tercepat dan teraman. Keberhasilan implementasi pemodelan komputasional ini memberikan instrumen logis dan terukur untuk memprediksi performa atlet, menjaga efisiensi metabolisme, dan mencegah kelelahan otot dini (SPE) secara tepat waktu. Pada penelitian mendatang, algoritma DP ini diproyeksikan untuk dikembangkan lebih luas menjadi modul backend pada sistem komputasi cloud untuk aplikasi pemantau aktivitas lari atau perangkat wearable. Sistem cerdas ini nantinya dapat beroperasi secara dinamis dengan memproses input data real-time, seperti elevasi topografi lintasan dan data cuaca aktual melalui Application Programming Interface (API). Lebih jauh lagi, penyatuan sistem dengan sensor pemindai aliran detak jantung (heart rate stream) dari jam tangan pintar akan memungkinkan algoritma untuk terus-menerus mengkalkulasi sisa kapasitas cadangan TEE pelari secara presisi di setiap kilometer yang tertempuh.

REFERENCES

- [1] I. Irmeilyana, P. B. J. Bangun, and H. Izzah, "Solution of Multiple Constraints Knapsack Problem (MCKP) by Using Branch and Bound Method and Greedy Algorithm," *Journal of Modeling and Optimization*, vol. 9, no. 2, 2017.
- [2] L. Puspitasari, A. Sugandha, and S. R. Nurshiami, "Implementation of Dynamic Programming Algorithm on The Integer Knapsack Problem (0/1) (Case Study: J&T Cargo Agent Purwokerto)," *International Journal of Quantitative Research and Modeling*, vol. 6, no. 3, pp. 316-322, 2025.
- [3] M. Johansson, J. Atterfors, and J. Lamm, "Pacing Patterns of Half-Marathon Runners: An analysis of ten years of results from Gothenburg Half Marathon," *International Journal of Computer Science in Sport*, vol. 22, no. 1, 2023.
- [4] A. Y. Saleh and M. T. A. H. Aga, "A study on energy expenditure in different running distances through physiological indicators," *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, vol. 8, no. 2, pp. 2627-2634, 2025.

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