



Penentuan Rute dan Jumlah Kendaraan pada Kasus *School Bus Routing Problem*: Penerapan Algoritma *Record-to-Record Travel*

Determining Route and Number of Vehicle for School Bus Routing Problem Case: An Application of Record-to-record Travel Algorithm

Fadillah Ramadhan*, Arif Imran

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional

ARTICLE INFO

Riwayat artikel:

Diterima 24-05-2018

Diperbaiki 18-08-18

Disetujui 21-09-2018

Kata Kunci:

Distribusi, heuristic, record-to-record, SBRP, transportasi, VRP

ABSTRAK

Program bus sekolah gratis merupakan salah satu program yang sedang dikembangkan untuk menunjang kemajuan pendidikan. Penentuan rute dan jumlah bus sekolah yang dapat meminimumkan biaya perjalanan dan pengadaan kendaraan merupakan aspek penting dalam menerapkan program bus sekolah. Penelitian ini membangun algoritma dan program perangkat lunak untuk model school bus routing problem (SBRP) yang dapat meminimisasi biaya perjalanan dan biaya investasi jumlah kendaraan bus. Algoritma record-to-record travel digunakan untuk mendapatkan solusi yang baik dengan waktu komputasi yang relatif cepat pada program perangkat lunak yang dibangun. Karakteristik model SBRP pada penelitian ini, bus memiliki kapasitas terbatas dan homogen, titik awal bus berada di depot, lalu mendatangi beberapa halte dimana setiap halte memiliki jumlah penumpang yang deterministik. Setelah mendatangi halte terakhir, bus akan mendatangi halte dengan arah kebalikannya yang diakhiri di titik awal (depot). Program bus sekolah gratis di Kota Bandung dijadikan objek penelitian mengingat program tersebut sedang diterapkan dan dievaluasi untuk meningkatkan efektivitas penggunaannya. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini, model SBRP dan algoritma record-to-record travel yang dibangun dan diujikan pada kasus bus sekolah di Kota Bandung memperlihatkan solusi yang layak dan baik dengan total biaya yang minimum. Proses pengelompokkan bus per wilayah Kota Bandung dapat dihasilkan dan menunjukkan biaya perjalanan dan biaya investasi pengadaan kendaraan bus yang minimum. Selain itu, algoritma ini terbukti dapat menyelesaikan permasalahan SBRP dengan waktu komputasi yang cepat, yaitu dibawah 10 detik.

ABSTRACT

The free school bus program is one of program developed to support the improvement of education. Determination of the route and the number of school buses that can minimize travel and vehicle procurement costs are an important aspect in implementing the school bus program. This research builds an algorithm and software program for school bus routing problem (SBRP) model that can minimize the travel and investment cost of the bus. The record-to-record travel algorithm is used for obtaining a good solution with a reasonable time on the software program that's being built. Characteristics of the SBRP model in this study, the bus vehicle has a limited and homogeneous capacity, the starting point of the bus is in the depot, and then the bus travel to each bus stop where each stop has a deterministic number of passengers. After arriving at the last bus stop, the bus will come to the bus stop in the opposite direction that ends at the starting point of the depot. The free bus program in Bandung City is used as an object of research. The results obtained in this study, the SBRP model and the record-to-record travel algorithm that was built and tested in the case of school buses in Bandung City are feasible and the result is good. The process of buses grouping for each region of Bandung City can be generated with the minimum operational costs. In addition, this algorithm is proven to solve the problem of SBRP with fast completion time, which is less than 10 seconds.

Keywords:

Distribution, heuristic, record-to-record, SBRP, transportation, VRP

*Penulis korespondensi

Email: fr.fadillahramadhan@gmail.com (Ramadhan, F.), arifmr@yahoo.com (Imran, A.)

1. Pendahuluan

Penyediaan sarana transportasi untuk kegiatan sekolah seperti bus sekolah merupakan salah satu sarana penunjang yang sangat penting dalam membangun pendidikan di suatu daerah. Di berbagai daerah, program bus sekolah yang aman, nyaman, murah, bahkan gratis merupakan salah satu program yang sedang diterapkan dan dikembangkan untuk menunjang kemajuan pendidikan. Salah satu aspek penting dalam menerapkan program bus sekolah tersebut adalah penentuan rute dan jumlah bus yang dapat meminimumkan biaya operasional. Dengan biaya operasional yang minimum, maka program bus sekolah dapat diimplementasi dalam jangka waktu yang lama dan memungkinkan adanya penetapan biaya yang gratis bagi setiap pemakainya.

Penentuan rute yang minimum dalam kegiatan transportasi merupakan bahasan penting dalam lingkup *vehicle routing problem* (VRP). VRP merupakan permasalahan rute yang berkaitan dengan perancangan rute transportasi dalam pelayanan pendistribusian atau pengambilan produk dari titik asal ke beberapa titik tujuan [1, 2]. Pada kasus bus sekolah, fokus pelayanan berada pada manusia yang dianalogikan sebagai objek pendistribusian yang biasa dikenal sebagai *school bus routing problem* (SBRP). SBRP merupakan varian dari VRP yang pada prinsipnya terfokus pada aspek persiapan data, penentuan tempat berhenti bus, penentuan rute bus, waktu pulang dan pergi bus beserta penjadwalan pergantian rute [3].

Terdapat beberapa peneliti yang telah melakukan penelitian terkait dengan SBRP [4, 5, 6]. Li dan Fu [7] membahas terkait SBRP dengan menggunakan *multi-objective combinatorial optimization*. *Multi-objective* yang dimaksud adalah penelitian yang dilakukan untuk menyelesaikan lebih dari satu fungsi tujuan, yaitu untuk meminimumkan jumlah bus yang dibutuhkan dan jumlah waktu perjalanan dari permasalahan SBRP dengan menggunakan algoritma *heuristic*.

Riera-Ledesma dan Salazar-Gonzalez [8] memecahkan permasalahan SBRP dengan menggunakan *multiple vehicle traveling purchaser*. Penelitian tersebut mengkombinasikan penyeleksian tempat berhenti bus dan penentuan rute bus dengan algoritma *branch-and-cut*.

Beberapa penelitian SBRP yang diimplementasi langsung pada studi kasus dilakukan oleh Huo dkk. [9] yang meneliti SBRP dengan menggunakan algoritma *ant colony optimization* (ACO). Pada penelitian tersebut dihasilkan bahwa metode yang digunakan memungkinkan untuk diterapkan pada kasus nyata. Penelitian lain sejenis yang modelnya diterapkan pada kasus nyata adalah penelitian Limiardi dan Cakravastia [2]. Pada penelitian tersebut diperimbangkan beberapa pembatas penting yaitu batasan panjang rute, waktu transportasi, waktu *loading* dan *unloading* dengan menggunakan algoritma *simulated annealing*. Hasil dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa beberapa solusi dapat diterapkan di kasus nyata.

Beberapa penelitian SBRP yang telah dijelaskan sebelumnya, mayoritas menggunakan algoritma *heuristic* yang hasilnya masih bisa dikatakan belum optimal atau penggunaan metode optimisasi yang waktu penyelesaian masalahnya masih relatif terlalu lama. Salah satu penelitian yang

membandingkan beberapa metode pemecahan masalah VRP adalah penelitian Li dkk. [10]. Pada penelitian tersebut, dibandingkan beberapa algoritma *heuristic* terhadap suatu algoritma yaitu algoritma *record-to-record travel*. Hasil dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa algoritma *record-to-record travel* menghasilkan beberapa solusi baru yang lebih baik, dan waktu penyelesaiannya relatif lebih cepat. Algoritma *record-to-record travel* merupakan varian dari algoritma *simulated annealing* yang dapat melakukan *uphill moves* yang bertujuan untuk mencegah terjebaknya suatu hasil yang minimum secara lokal [11]. Algoritma ini dapat dikembangkan untuk meminimisasi total biaya yang didalamnya terdiri dari beberapa jenis biaya termasuk biaya *fixed cost* jumlah kendaraan [12].

Berdasarkan hal tersebut, untuk menghasilkan solusi yang lebih baik dari sebelumnya dengan waktu penyelesaian masalah yang lebih cepat, maka penelitian ini bertujuan untuk membangun algoritma dan program perangkat lunak untuk model *school bus routing problem* (SBRP) yang dapat meminimisasi biaya perjalanan bus dan biaya investasi jumlah kendaraan bus dengan menggunakan algoritma *record-to-record travel*. Karakteristik dari SBRP yang akan dibangun adalah kendaraan bus yang homogen dan memiliki kapasitas terbatas berawal dari depot, lalu mendatangi titik tujuan berupa halte yang jumlahnya lebih dari satu dimana setiap halte memiliki jumlah penumpang yang deterministik, dan setelah mendatangi halte terakhir maka bus akan mendatangi halte kembali dalam arah yang sebaliknya yang diakhiri ke titik awal depot.

Penerapan model SBRP dan algoritma *record-to-record travel* ini akan diterapkan pada kasus bus sekolah di Kota Bandung. Saat ini, Pemerintah Kota Bandung sedang menerapkan dan mengevaluasi program bus sekolah gratis yang telah diimplementasi. Berdasarkan data Dinas Pendidikan Kota Bandung [13] bahwa masih terdapat 550 sekolah atau sekitar 44,56% dari total jumlah sekolah di Kota Bandung yang belum terakomodasi dan belum terjangkau oleh bus sekolah gratis tersebut. Kondisi awal dari rute bus sekolah sekarang ini masih harus dievaluasi, karena rute yang diterapkan masih belum efektif mengingat masih banyak sekolah yang belum dapat dilewati.

Dengan demikian, penelitian ini akan menentukan rute dan jumlah kendaraan yang sesuai dengan jumlah siswa-siswi yang ada di Kota Bandung dimana proses penentuan rute dan jumlah bus akan dikelompokkan berdasarkan wilayah di Kota Bandung. Diharapkan penelitian ini dapat membantu pemerintah sebagai rancangan awal dalam mengevaluasi program bus sekolah gratis di Kota Bandung.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan dari penyelesaian masalah. Tahapan pertama adalah mendeskripsikan masalah yang akan diteliti, lalu melakukan formulasi matematis dari permasalahan yang ada, dan dilanjutkan dengan menerapkan algoritma *record-to-record travel* beserta program perangkat lunak yang dibangun untuk mengolah data penentuan rute dan jumlah kendaraan bus. Berdasarkan metodologi tersebut, nantinya dilakukan pengujian pada data kasus nyata untuk diusulkan rancangan awal dalam rute dan jumlah kendaraan yang dapat

diimplementasi. Penelitian ini menggunakan model pengembangan yang berawal dari Moin dkk. [14], dan penambahan dari model Limiardi dan Cakravastia [2]. Algoritma penyelesaian masalah dikembangkan dari algoritma awal Li dkk. [10] dengan menggunakan data objek penelitian dari Limiardi [15].

2.1 Deskripsi permasalahan

Pada penelitian ini, permasalahan yang dirancang adalah permasalahan yang terdiri dari sejumlah titik tujuan halte yang harus didatangi, dimana titik awal bus berada di depot dan berakhir di depot, bus memiliki kapasitas terbatas, dan dilakukan pengelompokkan rute berdasarkan wilayah. Penentuan rute ini terdiri dari sejumlah halte yang di setiap halte terdapat penumpang berjumlah deterministik. Pada kasus ini jumlah bus tidak terbatas dan biaya operasional bus terdiri dari biaya perjalanan bus dan biaya investasi bus. Penelitian ini memiliki tujuan untuk meminimumkan biaya perjalanan bus dan biaya investasi bus pada jangka waktu tertentu dengan menggunakan algoritma *record-to-record travel*.

2.2 Formulasi matematis

Formulasi matematis adalah tahapan digambarkannya model penelitian. Pada tahapan ini diformulasikan model penelitian *school bus routing problem* (SBRP) berdasarkan karakteristik dari penentuan rute dan jumlah kendaraan yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada penelitian ini, model Moin dkk. [14] digunakan dengan menghilangkan variabel atau pembatas terkait dengan persediaan, serta diadaptasi pula model Limiardi dan Cakravastia [2] untuk melengkapinya. Berdasarkan penjelasan sebelumnya, permasalahan SBRP beserta notasi dan model matematis yang dirancang adalah sebagai berikut:

Indeks

$h = \{1, 2, \dots, H\}$ satu set halte yang memiliki penumpang h dimana halte h ($h \in H$)

$d = \{0\}$ depot

Parameter

k Kapasitas maksimum per kendaraan bus

inv Biaya investasi per kendaraan bus (*fixed cost*)

t Biaya perjalanan per jarak perjalanan

r_{ij} Jarak dari halte i ke j dimana $r_{ij} = r_{ji}$, untuk setiap i dan j

p_i Jumlah penumpang di halte i

Variabel

x_{ij} Penugasan kendaraan bus dari halte i ke halte j

a_i Jumlah penumpang yang diangkut dari halte i

q_{ij} Jumlah penumpang yang dikirmkan dari halte i ke halte j

Fungsi Tujuan:

$$Z = \min \left(t \sum_{\substack{j \in H \cup d \\ j \neq i}} \sum_{i \in H \cup d} r_{ij} (x_{ij}) + inv \sum_{i \in H} x_{0i} \right) \quad (1)$$

Fungsi Pembatas:

$$\sum_{\substack{i \in H \cup d \\ i \neq j}} q_{ij} + a_j = \sum_{\substack{i \in H \\ i \neq j}} q_{ji}, \quad \forall j \in H \quad (2)$$

$$\sum_{i \in H} q_{i0} = \sum_{i \in H} a_i \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{i \in H \cup d \\ i \neq j}} x_{ij} = \sum_{\substack{i \in H \cup d \\ i \neq j}} x_{ji}, \quad \forall j \in H \quad (4)$$

$$q_{ij} \leq k, \quad \forall i \in H, \forall j \in H, i \neq j \quad (5)$$

$$q_i \geq 0, \quad \forall i \in H \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in H \quad (7)$$

$$x_{0j} \geq 0 \text{ and integer}, \quad \forall j \in H \quad (8)$$

$$x_{i0} \geq 0 \text{ and integer}, \quad \forall i \in H \quad (9)$$

$$x_{ij} = 0, \quad i, j \in D \quad (10)$$

$$q_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in H, \forall j \in H \quad (11)$$

$$q_{0i} = 0, \quad \forall i \in H \quad (12)$$

Penjelasan dari formulasi matematis tersebut adalah sebagai berikut: (1) Fungsi tujuan dari penelitian ini yang terdiri dari biaya perjalanan kendaraan bus dan biaya investasi untuk jumlah kendaraan bus yang digunakan; (2) Batasan untuk keseimbangan aliran untuk setiap halte yang dilalui; (3) Jumlah penumpang yang diantarkan secara akumulasi; (4) Batasan dari model untuk keseimbangan jumlah kendaraan yang pergi dan pulang; (5) Kapasitas kendaraan untuk setiap keberangkatan kendaraan bus; (6 sampai dengan 12) Batasan variabel tidak bernilai negatif.

2.3 Algoritma *record-to-record travel* pada kasus SBRP

Algoritma *record-to-record travel* merupakan algoritma yang dapat digunakan untuk menghindari terjebaknya suatu hasil dalam solusi minimum lokal. Dueck [11] menjelaskan algoritma dari *record-to-record travel* tersebut, dimana algoritma ini menentukan X sebagai solusi awal dan X' sebagai alternatif solusi. Solusi terbaik sementara yang didapatkan dijadikan dasar untuk menghitung *record deviation*.

Pada penelitian Li dkk. [10] besarnya deviasi adalah 1% dari *record* terbaik sementara. Jika dalam proses pencarian solusi didapatkan X' yang kurang dari *record* ditambah deviasinya, maka X' tersebut menjadi solusi terbarunya. Secara lebih rinci, langkah-langkah dalam menerapkan algoritma *record-to-record travel* adalah sebagai berikut:

Inisialisasi:

Set $A = 30$; $B = 20$; $C = 30$; $global\ record = \sim$; $global\ record\ deviation = 1\% \times global\ record$

Tahap 1:

Pencarian solusi layak menggunakan algoritma *least cost insertion*; $set\ record =$ nilai output berdasarkan solusi terbaik sementara; $set\ record\ deviation = 1\% \times record$

Tahap 2:

Set $itr = 0$

Do while $itr \leq A$

Set $cnt = 0$

Do while $cnt \leq B$

For $i = 1$ to C

One-point-move; two-point-move; swap-route; two-opt-intra-route;

two-opt-inter-route

If solusi = "tidak layak" then

Go to line "local search"

End if

If solusi = "tidak layak" then

If solusi < record + record deviation then

Set record = current solution

Set record deviation = $1\% \times record$

Set $cnt = 0$

End if

End if

Next i

local search:

one-point-move; swap-route; two-opt-intra-route; two-opt-inter-route

(downhill moves)

If solusi = "layak" then

If solusi < record + record deviation then

Set record = current solution

Set deviation = $1\% \times record$

Set $cnt = 0$

End if

End if

$cnt = cnt + 1$

Loop

If record < global record + global record deviation

Set global record = record

Set global record deviation = $1\% \times global\ record$

Set $itr = 0$

End if

$itr = itr + 1$

Loop

Output dari solusi *global record*

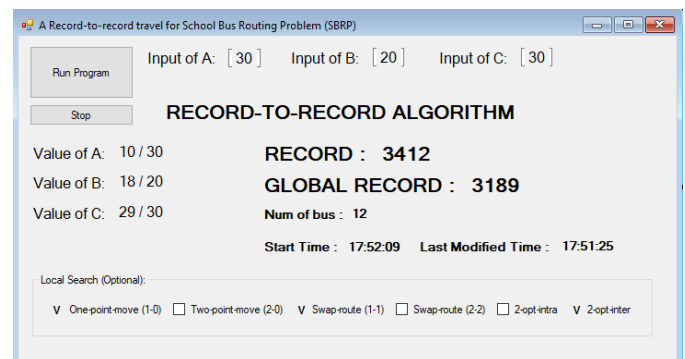
Berdasarkan algoritma tersebut, notasi A merupakan jumlah maksimum iterasi yang diperbolehkan ketika *global record* tidak berubah. Notasi B merupakan jumlah maksimum iterasi yang diperbolehkan ketika *local record* tidak di berubah. Notasi C menggambarkan jumlah iterasi *record-to-record travel* dalam melakukan *uphill move* berdasarkan solusi yang diperoleh. Pada penelitian ini dan eksperimen yang dilakukan untuk menghasilkan solusi terbaik, penelitian ini menggunakan nilai A sebesar 30, B sebesar 20, dan C

sebesar 30. Penetapan angka tersebut mengikuti eksperimen yang dilakukan oleh Li dkk. [10].

Untuk *downhill move* digunakan lima *local search* yaitu *one-point-move*, *two-point-move*, *swap-route*, *2-opt-intra*, dan *2-opt-inter*. Cara kerja dari *local search* tersebut adalah sebagai berikut: (1) Cara kerja *one-point-move* adalah dengan mengambil satu *node* secara random pada suatu rute dan dipindahkan *node* tersebut ke rute lain yang dapat menghasilkan *travel cost* paling minimum; (2) Cara kerja dari *two-point-move* sama dengan istilah *2-0 shift* pada penelitian Imran dkk. [16] dimana akan diambil dua *node* yang berdekatan secara random pada suatu rute tertentu dan akan dipindahkan pada rute lain yang paling meminimumkan *travel cost*; (3) Cara kerja dari *swap-route* dilakukan dengan mengambil satu *node* secara random dan *node* tersebut dipindahkan ke rute lain secara sistematis dan dicari posisi yang paling meminimumkan *travel cost*. Prosedur tersebut sama dengan prosedur *1-1 interchange* pada penelitian Imran dkk. [16]; (4) *2-opt-intra* dilakukan untuk menghilangkan terjadinya persilangan pada satu rute, sedangkan *2-opt-inter* dilakukan untuk menghilangkan persilangan antar rute.

2.4 Perancangan perangkat lunak pengolahan algoritma record-to-record travel

Pada penelitian ini, dibangun program perangkat lunak pengolahan algoritma *record-to-record travel*. Program tersebut berfungsi untuk melakukan pengolahan data input menjadi output berupa rute terbaik dan jumlah kendaraan terbaik yang dapat meminimumkan biaya perjalanan ataupun biaya investasi pengadaan kendaraan bus. Dengan menggunakan program yang dibangun, akan terlihat proses perubahan dari setiap *record* yang didapatkan dan dapat dilakukan eksperimen secara langsung untuk melakukan percobaan perubahan nilai parameter, maupun pemilihan logika *local search* yang akan digunakan. Pembangunan program menggunakan Visual Studio 2017 sebagai logika inti dalam pemrosesan data, sedangkan input dan output program menggunakan media *Microsoft Office Excel*. Contoh *user interface* dari program perangkat lunak ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Contoh *user interface* program perangkat lunak

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini proses penginputan data menggunakan data penelitian Limiardi [15] yang melakukan penelitian pada studi kasus bus sekolah Kota Bandung. Data tersebut diobservasi dan divalidasi secara langsung dan

dibantu dengan perangkat lunak *Google Maps API* untuk penentuan jarak. Pada penelitian tersebut didapatkan data jarak antar halte dan data parameter lain yang relevan dengan kebutuhan pengolahan data pada penelitian ini. Data lokasi untuk setiap halte beserta jaraknya dapat dilihat pada Tabel 1 sampai dengan 17.

Tabel 1
Lokasi dan kode halte bus wilayah bandung barat

No. Halte	Lokasi Halte	Rata-rata Jumlah Penumpang
Halte B01	Jl. Rajawali Timur (Persimpangan Jl. Rajawali-Garuda)	24
Halte B02	Jl. Rajawali Timur (Daerah Rajawali Plaza)	24
Halte B03	Jl. Kebonjati (Daerah RS. Kebonjati)	24
Halte B04	Jl. Kebonjati (Daerah Bandung Textile Center)	24
Halte B05	Jl. Sudirman (Persimpangan Elang)	24
Halte B06	Jl. Sudirman (Daerah SDN Bandung Raya Barat)	24
Halte B07	Jl. Sudirman (Daerah Pal 3 Cijerah)	24
Halte B08	Jl. Rajawali Barat (Daerah Gudang Rajawali)	24

Tabel 2
Lokasi dan kode halte bus wilayah bandung utara

No. Halte	Lokasi Halte	Rata-rata Jumlah Penumpang
Halte U01	Jl. Pasteur (Daerah Gd. Panti Asuhan Dana Mulya)	30
Halte U02	Jl. Pasteur (Daerah ATM Mandiri RS. Hasan Sadikin)	30
Halte U03	Jl. Dr. Djujungan (Daerah Shuttle Cipaganti Travel)	30
Halte U04	Jl. Suria Sumantri (Depan Univ. Kristen Maranatha)	30
Halte U05	Jl. Setra Sari (Daerah Shuttle Transline Travel)	30
Halte U06	Jl. Sari Manis (Daerah lahan kosong)	30
Halte U07	Jl. Pasteur (Daerah PT. Biofarma)	30

Tabel 3
Lokasi dan kode halte bus wilayah bandung timur

No. Halte	Lokasi Halte	Rata-rata Jumlah Penumpang
Halte T01	Jl. Ahmad Yani (Daerah Pasar Kosambi)	21
Halte T02	Jl. Ahmad Yani (Daerah Segitiga Mas)	21
Halte T03	Jl. Ahmad Yani (Daerah Dinas Pendidikan)	21
Halte T04	Jl. Ahmad Yani (Daerah Sekejati)	21
Halte T05	Jl. A.H. Nasution (Daerah Terminal Cicaheum)	21
Halte T06	Jl. Ahmda Yani (Daerah Kantor BCA Cicadas)	21
Halte T07	Jl. Ibrahim Adjie (Daerah Gedung Matahari)	21
Halte T08	Jl. Jakarta (Daerah Persimpangan Kiara Condong)	21
Halte T09	Jl. Ahmad Yani (Daerah Stadion Persib)	21
Halte T10	Jl. Ahmad Yani (Daerah Rel Kereta Api Kosambi)	21
Halte T11	Jl. Ahmad Yani (Daerah Kantor Pos Kosambi)	21
Halte T12	Jl. Ahmad Yani (Daerah Gedung Balai Besar Tekstil)	21
Halte T13	Jl. Jakarta (Daerah Gedung Agronesia)	21
Halte T14	Jl. Jakarta (Daerah Gedung STMIK AMIK)	21
Halte T15	Jl. Sukabumi (Daerah Gedung IBCC)	21

Tabel 4
Lokasi dan kode halte bus wilayah bandung tengah

No. Halte	Lokasi Halte	Rata-rata Jumlah Penumpang
Halte E01	Jl. Asia Afrika (Daerah Graha Bank Panin)	14
Halte E02	Jl. Asia Afrika (Daerah Alun-alun Kota Bandung)	14
Halte E03	Jl. PHH. Mustofa (Daerah Surapati Core)	14
Halte E04	Jl. PHH Mustofa (Daerah Persimpangan Cimuncang)	14
Halte E05	Jl. PHH Mustofa (Daerah Jiwarsaya Surapati)	14
Halte E06	Jl. PHH Mustofa (Daerah Bilingual School)	14
Halte E07	Jl. Surapati (Daerah SDN Cihaurgeulis)	14
Halte E08	Jl. Surapati (Daerah YPKP)	14
Halte E09	Jl. Surapati (Daerah Kanwil BKN)	14
Halte E10	Jl. Surapati (Daerah Kantor Dinas Pertanian)	14
Halte E11	Jl. Surapati (Daerah Kantor Pertamina)	14
Halte E12	Jl. Surapati (Daerah Kantor Balai Ilmiah ITB)	14
Halte E13	Jl. Cikapayang (Daerah ESC)	14
Halte E14	Jl. Cikapayang (Daerah Persimpangan Dago)	14
Halte E15	Jl. Perintis Kemerdekaan (Indonesia Menggugat)	14
Halte E16	Jl. Lembong (Daerah Plaza Telkom)	14
Halte E17	Jl. Asia Afrika (Daerah Gedung Keuangan Negara)	14

Tabel 5
Lokasi dan kode halte bus wilayah bandung selatan

No. Halte	Lokasi Halte	Rata-rata Jumlah Penumpang
Halte S01	Jl. Leuwipanjang (Daerah Terminal)	38
Halte S02	Jl. BKR (Daerah Taman Tegalega)	38
Halte S03	Jl. BKR (Daerah Dokkes Polda Jabar)	38
Halte S04	Jl. BKR (Daerah Gedung Keuangan CKC)	38
Halte S05	Jl. BKR (Daerah Patung Ikan)	38
Halte S06	Jl. Pelajar Pejuang 45 (Daerah Persimpangan Seledri)	38

Tabel 6
Data jarak antar halte wilayah bandung barat (dalam satuan meter)

Jarak	Halte B01	Halte B02	Halte B03	Halte B04	Halte B05	Halte B06	Halte B07	Halte B08
Halte B01	0	1200	2000	2300	2000	2500	4600	2000
Halte B02	1200	0	1400	1800	3000	1900	3500	4100
Halte B03	2000	1400	0	400	3200	2300	3800	4400
Halte B04	2300	1800	400	0	3500	2500	4100	4600
Halte B05	2000	3000	3200	3500	0	11600	12100	8400
Halte B06	2500	1900	2300	2500	11600	0	1500	2100
Halte B07	4600	3500	3800	4100	12100	1500	0	600
Halte B08	2000	4100	4400	4600	8400	2100	600	0

Tabel 7
Data jarak antar halte wilayah bandung utara (dalam satuan meter)

Jarak	Halte U01	Halte U02	Halte U03	Halte U04	Halte U05	Halte U06	Halte U07
Halte U01	0	500	3300	3600	4700	5100	400
Halte U02	500	0	3400	3700	4900	5200	600
Halte U03	3300	3400	0	4600	5700	6000	2200
Halte U04	3600	3700	4600	0	1100	1400	5000
Halte U05	4700	4900	5700	1100	0	1300	3800
Halte U06	5100	5200	6000	1400	1300	0	4800
Halte U07	400	600	2200	5000	3800	4800	0

Tabel 9
Data jarak antar halte T01-T08 wilayah bandung timur (dalam satuan meter)

Jarak	Halte T01	Halte T02	Halte T03	Halte T04	Halte T05	Halte T06	Halte T07	Halte T08
Halte T01	0	500	800	1300	4500	3200	6000	2900
Halte T02	500	0	300	800	3900	2700	6100	2300
Halte T03	800	300	0	500	3700	2400	5800	2100
Halte T04	1300	800	500	0	3200	1900	6000	1600
Halte T05	4500	3900	3700	3200	0	1100	8100	2300
Halte T06	3200	2700	2400	1900	1100	0	7000	1200
Halte T07	6000	6100	5800	6000	8100	7000	0	3300
Halte T08	2900	2300	2100	1600	2300	1200	3300	0

Tabel 10
Data jarak antar halte T01-T08 dengan T09-T15 wilayah bandung timur (dalam satuan meter)

Jarak	Halte T09	Halte T10	Halte T11	Halte T12	Halte T13	Halte T14	Halte T15
Halte T01	800	300	200	2300	2500	2400	1600
Halte T02	300	2700	1900	1700	2000	1800	1100
Halte T03	200	1400	600	1500	1700	1600	800
Halte T04	500	1900	1100	1000	1200	1100	1000
Halte T05	4100	5400	4700	4100	2700	3000	3500
Halte T06	3000	4400	3600	3100	1600	1900	2400
Halte T07	5100	4200	4100	5100	3700	4000	4500
Halte T08	1400	600	1600	1800	400	700	1000

Tabel 11
Data jarak antar halte T09-T15 dengan T01-T08 wilayah bandung timur (dalam satuan meter)

Jarak	Halte T01	Halte T02	Halte T03	Halte T04	Halte T05	Halte T06	Halte T07	Halte T08
Halte T09	800	300	200	500	4100	3000	5100	1400
Halte T10	300	2700	1400	1900	5400	4400	4200	600
Halte T11	200	1900	600	1100	4700	3600	4100	1600
Halte T12	2300	1700	1500	1000	4100	3100	5100	1800
Halte T13	2500	2000	1700	1200	2700	1600	3700	400
Halte T14	2400	1800	1600	1100	3000	1900	4000	700
Halte T15	1600	1100	800	1000	3500	2400	4500	1000

Tabel 12
Data jarak antar halte T09-T15 wilayah bandung timur (dalam satuan meter)

Jarak	Halte T09	Halte T10	Halte T11	Halte T12	Halte T13	Halte T14	Halte T15
Halte T09	0	2100	3100	1400	1700	1500	1200
Halte T10	2100	0	1000	2000	2200	2100	1300
Halte T11	3100	1000	0	2100	2300	2200	1400
Halte T12	1400	2000	2100	0	1500	1900	2300
Halte T13	1700	2200	2300	1500	0	300	800
Halte T14	1500	2100	2200	1900	300	0	600
Halte T15	1200	1300	1400	2300	800	600	0

Tabel 13
Data jarak antar halte wilayah bandung selatan (dalam satuan meter)

Jarak	Halte S01	Halte S02	Halte S03	Halte S04	Halte S05	Halte S06
Halte S01	0	2200	2200	2500	2500	4100
Halte S02	2200	0	2900	3200	3600	4800
Halte S03	2200	2900	0	1500	1100	3100
Halte S04	2500	3200	1500	0	400	3800
Halte S05	2500	3600	1100	400	0	3400
Halte S06	4100	4800	3100	3800	3400	0

Tabel 14
Data jarak antar halte E01-E09 wilayah bandung tengah (dalam satuan meter)

Jarak	Halte E01	Halte E02	Halte E03	Halte E04	Halte E05	Halte E06	Halte E07	Halte E08	Halte E09
Halte E01	0	3600	6000	6300	5600	4800	5100	4800	5000
Halte E02	3600	0	10100	9300	8500	7800	8000	7000	7100
Halte E03	6000	10100	0	900	1600	2400	2100	3200	3300
Halte E04	6300	9300	900	0	800	1500	1300	2300	2500
Halte E05	5600	8500	1600	800	0	700	500	1500	1700
Halte E06	4800	7800	2400	1500	700	0	200	800	1000
Halte E07	5100	8000	2100	1300	500	200	0	1000	1200
Halte E08	4800	7000	3200	2300	1500	800	1000	0	200
Halte E09	5000	7100	3300	2500	1700	1000	1200	200	0

Tabel 15
Data jarak antar halte E01-E09 dengan halte E10-E17 wilayah bandung tengah (dalam satuan meter)

Jarak	Halte E10	Halte E11	Halte E12	Halte E13	Halte E14	Halte E15	Halte E16	Halte E17
Halte E01	4500	5300	3900	4100	3900	3000	2500	500
Halte E02	6800	8000	6200	6300	4700	5900	8700	1200
Halte E03	4400	4800	4800	5000	5800	6500	3600	6600
Halte E04	3500	3900	3900	4100	4900	5600	3500	5700
Halte E05	2800	3100	3100	3300	4200	4800	3100	8800
Halte E06	2000	2400	2400	2600	3400	4100	2800	8500
Halte E07	2300	2600	2600	2800	3700	4300	3100	8800
Halte E08	1300	1600	1600	1800	2700	3300	3100	7400
Halte E09	1200	1500	1800	2000	2800	3500	3300	7600

Tabel 16
Data jarak antar halte E10-E16 dengan E01-E09 wilayah bandung tengah (dalam satuan meter)

Jarak	Halte E01	Halte E02	Halte E03	Halte E04	Halte E05	Halte E06	Halte E07	Halte E08	Halte E09
Halte E10	4500	6800	4400	3500	2800	2000	2300	1300	1200
Halte E11	5300	8000	4800	3900	3100	2400	2600	1600	1500
Halte E12	3900	6200	4800	3900	3100	2400	2600	1600	1800
Halte E13	4100	6300	5000	4100	3300	2600	2800	1800	2000
Halte E14	3900	4700	5800	4900	4200	3400	3700	2700	2800
Halte E15	3000	5900	6500	5600	4800	4100	4300	3300	3500
Halte E16	2500	8700	3600	3500	3100	2800	3100	3100	3300

Tabel 17
Data jarak antar halte E10-E16 wilayah bandung tengah (lanjutan)

Jarak	Halte E10	Halte E11	Halte E12	Halte E13	Halte E14	Halte E15	Halte E16
Halte E10	0	2100	1800	2000	2900	3100	3500
Halte E11	2100	0	2200	2000	3500	3700	4100
Halte E12	1800	2200	0	200	1600	2300	4300
Halte E13	2000	2000	200	0	200	2800	2300
Halte E14	2900	3500	1600	200	0	2600	2100
Halte E15	3100	3700	2300	2800	2600	0	1500
Halte E16	3500	4100	4300	2300	2100	1500	0

Selain data pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 10, berdasarkan penelitian Limardi [15] didapatkan data jarak

antara depot terhadap setiap halte yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada penelitian ini diasumsikan biaya transportasi per km adalah Rp. 700, biaya pengadaan satu bus sekolah adalah 1 miliar rupiah, dan kapasitas per bus yang ditetapkan adalah 70 orang. Asumsi angka-angka tersebut tidak akan mempengaruhi solusi yang diolah, karena pada dasarnya jarak pada rute yang sangat berperan penting dalam menentukan solusi terbaik. Penetapan asumsi tersebut dilakukan agar skala output dapat mendekati kasus nyata yang diamati. Berdasarkan data tersebut digunakan algoritma *record-to-record travel* untuk mendapatkan solusi terbaik yang paling minimum dari biaya transportasi dan biaya investasi pengadaan bus. Hasil dari pengolahan tersebut dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18
Hasil penentuan rute kendaraan bus sekolah kota bandung

Wilayah	Rute	Total Jarak Rute (km)	Total Penumpang Naik	CPU time
Barat	Depot → Halte B08 → Halte B07 → Halte B06 → Halte B04 → Halte B03 → Halte B02 → Halte B01 → Halte B05 → Depot	14,7	192 orang	2 detik
Utara	Depot → Halte U03 → Halte U07 → Halte U01 → Halte U02 → Halte U04 → Halte U05 → Halte U06 → Depot	22,8	210 orang	2 detik
Timur	Depot → Halte T10 → Halte T01 → Halte T06 → Halte T05 → Halte T08 → Halte T13 → Halte T14 → Halte T15 → Halte T03 → Halte T02 → Halte T09 → Halte T12 → Halte T04 → Halte T11 → Halte T07 → Depot	33,5	315 orang	6 detik
Selatan	Depot → Halte S01 → Halte S02 → Halte S04 → Halte S05 → Halte S03 → Halte S06 → Depot	24,7	228 orang	3 detik
Tengah	Depot → Halte E15 → Halte E10 → Halte E11 → Halte E09 → Halte E03 → Halte E04 → Halte E05 → Halte E07 → Halte E06 → Halte E08 → Halte E12 → Halte E13 → Halte E14 → Halte E16 → Halte E01 → Halte E17 → Halte E02 → Depot	33,7	238 orang	8 detik

Berdasarkan Tabel 18, didapatkan rute, total jarak, total penumpang naik untuk masing-masing wilayah, dan *CPU time* (lama waktu pengolahan data menggunakan perangkat lunak yang dibangun). Untuk memastikan terakomodirnya jumlah penumpang yang naik, maka total penumpang naik akan dibagi dengan kapasitas bus yang nantinya akan menentukan jumlah bus yang dibutuhkan per wilayah. Selain itu, agar setibanya di halte terakhir bus tidak langsung ke depot melainkan melewati halte dalam arah sebaliknya (sebagai arah pulang sekaligus melewati setiap halte untuk mengakomodir kebutuhan penumpang pada arah sebaliknya) maka didapatkan terdapat dua rute untuk setiap wilayah (pulang dan pergi). Hasil modifikasi rute tersebut dapat dilihat pada Tabel 19.

Berdasarkan Tabel 19, maka didapatkan total biaya perjalanan dan biaya investasi pengadaan kendaraan bus yang dapat dilihat pada Tabel 20. Hasil pada penelitian ini menunjukkan bahwa rute yang dihasilkan dapat menjadi alternatif untuk diimplementasikan pada kondisi sistem nyata di Kota Bandung. Rute yang telah dihasilkan dari algoritma *record-to-record travel* ini menghasilkan total biaya yang minimum dengan mempertimbangkan biaya transportasi dan biaya fixed cost kendaraan. Pengelompokkan wilayah seperti pada Tabel 20, dapat dijadikan rancangan awal untuk diterapkan pada rute bus sekolah di Kota Bandung.

Tabel 12
Modifikasi penentuan rute dan jumlah kendaraan bus sekolah kota Bandung

Wilayah	Kebutuhan Jumlah Bus	Arah Rute	Rute	Total Jarak Rute (km)
Barat	3 unit	Pergi	Depot → Halte B08 → Halte B07 → Halte B06 → Halte B04 → Halte B03 → Halte B02 → Halte B01 → Halte B05	11,4
		Pulang	Halte B05 → Halte B01 → Halte B02 → Halte B03 → Halte B04 → Halte B06 → Halte B07 → Halte B08 → Depot	
Utara	3 unit	Pergi	Depot → Halte U03 → Halte U07 → Halte U01 → Halte U02 → Halte U04 → Halte U05 → Halte U06	14,8
		Pulang	Halte U06 → Halte U05 → Halte U04 → Halte U02 → Halte U01 → Halte U07 → Halte U03 → Depot	
Timur	5 unit	Pergi	Depot → Halte T10 → Halte T01 → Halte T06 → Halte T05 → Halte T08 → Halte T13 → Halte T14 → Halte T15 → Halte T03 → Halte T02 → Halte T09 → Halte T12 → Halte T04 → Halte T11 → Halte T07	23,7
		Pulang	Halte T07 → Halte T11 → Halte T04 → Halte T12 → Halte T09 → Halte T02 → Halte T03 → Halte T15 → Halte T14 → Halte T13 → Halte T08 → Halte T05 → Halte T06 → Halte T01 → Halte T10 → Depot	
Selatan	4 unit	Pergi	Depot → Halte S01 → Halte S02 → Halte S04 → Halte S05 → Halte S03 → Halte S06	16,9
		Pulang	Halte S06 → Halte S03 → Halte S05 → Halte S04 → Halte S02 → Halte S01 → Depot	
Tengah	4 unit	Pergi	Depot → Halte E15 → Halte E10 → Halte E11 → Halte E09 → Halte E03 → Halte E04 → Halte E05 → Halte E07 → Halte E06 → Halte E08 → Halte E12 → Halte E13 → Halte E14 → Halte E16 → Halte E01 → Halte E17 → Halte E02	25,7
		Pulang	Halte E02 → Halte E17 → Halte E01 → Halte E16 → Halte E14 → Halte E13 → Halte E12 → Halte E08 → Halte E06 → Halte E07 → Halte E05 → Halte E04 → Halte E03 → Halte E09 → Halte E11 → Halte E10 → Halte E15 → Depot	

Tabel 13
Hasil penentuan rute kendaraan bus sekolah kota Bandung

Wilayah	Kebutuhan Jumlah Bus	Total Jarak Rute (km)	Total Biaya Investasi	Total Biaya Perjalanan per trip (pergi-pulang)
Barat	3 unit	22,8	Rp. 3 miliar	Rp. 15.960
Utara	3 unit	29,6	Rp. 3 miliar	Rp. 20.720
Timur	5 unit	47,4	Rp. 5 miliar	Rp. 33.180
Selatan	4 unit	33,8	Rp. 4 miliar	Rp. 23.660
Tengah	4 unit	51,4	Rp. 4 miliar	Rp. 35.980

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini diadaptasi algoritma *record-to-record travel* untuk menyelesaikan *school bus routing problem* (SBRP) yang bertujuan untuk meminimisasi biaya perjalanan dan biaya investasi pengadaan kendaraan bus. Algoritma *record-to-record travel* yang dikembangkan dapat menyelesaikan permasalahan SBRP dengan nilai waktu penyelesaian berdasarkan perangkat lunak yang dibangun adalah dibawah 10 detik. Hal tersebut membuktikan bahwa algoritma ini dapat menghasilkan solusi dengan waktu yang cepat. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa model dan algoritma tersebut dapat diuji pada kasus nyata seperti kasus bus sekolah di Kota Bandung. Berdasarkan hasil yang didapatkan, dibutuhkan 19 bus sekolah yang tersebar di lima wilayah Bandung (3 Bandung Barat, 3 Bandung Utara, 5 Bandung Timur, 4 Bandung Selatan, dan 4 Bandung Tengah). Hal ini menunjukkan bahwa pengelompokan bus sekolah

berdasarkan wilayah Bandung feasible untuk diimplementasi dengan biaya investasi dan biaya perjalanan per trip yang relatif cukup rendah. Penelitian ini dapat memperkaya pengetahuan dibidang penentuan rute, baik dari pengembangan model maupun pengembangan algoritma untuk penyelesaian masalah. Meskipun penelitian ini telah menghasilkan solusi, masih ada beberapa pengembangan yang harus dilakukan, seperti penentuan nilai parameter pada algoritma *record-to-record travel* yang lebih sesuai, atau mempertimbangkan waktu tunggu penumpang di halte ataupun waktu tunggu penumpang di dalam bus.

Referensi

- [1] S. Mancini, "The hybrid vehicle routing problem," *Transportation Research Part C*, vol. 78, pp. 1-12, 2017.
- [2] K. Limiardi and A. Cakravastia, "Development model for determination of the route of school bus with length route, riding time, loading-unloading time, and capacitated fleet by using simulated annealing method," in *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Bali, Indonesia, 2016.
- [3] J. Park and B.-I. Kim, "The school bus routing problem: A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 202, pp. 311-319, 2010.
- [4] W. A. Ellegood and J. F. Campbell, "Continuous approximation models for mixed load school bus routing," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 77, pp. 182-198, 2015.
- [5] F. M. S. Lima, D. S. Pereira, S. V. Conceicao and N. T. R. Nunes, "A mixed load capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet: Algorithms for the Brazilian context," *Expert Systems with Applications*, vol. 56, pp. 320-334, 2016.
- [6] S. P. Parvasi, M. Mahmoodjanloo and M. Setak, "A bi-level school bus routing problem with bus stops selection and possibility of demand outsourcing," *Applied Soft Computing*, vol. 61, pp. 222-238, 2017.
- [7] L. Li and Z. Fu, "The school bus routing problem: A case study," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, pp. 552-558, 2002.
- [8] J. Riera-Ledesma and J.-J. Salazar-Gonzalez, "Solving school bus routing using the multiple vehicle traveling purchaser problem: A branch-and-cut approach," *Computers & Operations Research*, vol. 39, pp. 391-404, 2012.
- [9] L. Huo, G. Yan, H. Wang and W. Gao, "School bus routing problem based on ant colony optimization algorithm," in *ITEC Asia-Pacific*, Beijing, China, 2014.
- [10] F. Li, B. Golden and E. Wasil, "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers & Operation Research*, vol. 34, pp. 2734-2742, 2007.
- [11] G. Dueck, "New optimization heuristics: The great deluge algorithm and the record-to-record travel," *Journal of Computational Physics*, vol. 104, pp. 86-92, 1993.
- [12] F. Ramadhan, A. Imran and A. F. Rizana, "A record-to-record travel algorithm for multi-product and multi-period inventory routing problem," in *5th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, Singapore, 2018.
- [13] Dinas Pendidikan Kota Bandung, "Dinas Pendidikan Kota Bandung," 2016. [Online]. Available: <https://disdik.bandung.go.id>. [Accessed 8 January 2018].
- [14] N. H. Moin, S. Salhi and N. A. B. Aziz, "An efficient hybrid

- genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem," *International Journal Production Economics*, vol. 133, pp. 334-343, 2011.
- [15] K. Limiardi, *Pengembangan model penentuan rute bus sekolah dengan mempertimbangkan length route, riding time, loading-unloading time, dan kapasitas bus menggunakan metode simulated annealing*, Bandung, Indonesia: Institut Teknologi Bandung, 2017.
- [16] A. Imran, S. Salhi and N. A. Wassan, "A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 197, pp. 509-518, 2009.