

Optimasi Kecepatan Kereta Api Menggunakan Metode Kontrol Model Prediksi

Pamor Gunoto

Jurusan Teknik Elektro

Universitas Riau Kepulauan (UNRIKA)

Jl. Batu Aji Baru No. 99, Batu Aji - Batam

Email : pgunoto@yahoo.co.id

Abstrak

Pada sistem jaringan kereta api, Grafik Perjalanan Kereta Api merupakan bagian yang sangat penting karena berperan pada suatu sistem jaringan kereta api yang sangat kompleks. Suatu keterlambatan kereta api tunggal dapat menyebabkan efek beruntun pada kereta api lainnya sehingga sistem penjadwalan akan mengalami perubahan sangat signifikan. Salah satu solusi yang digunakan untuk meminimumkan keterlambatan kereta api adalah dengan mengoptimalkan kecepatan kereta api untuk meminimumkan waktu tempuh kereta api. Penelitian ini menggunakan metode Kontrol Model Prediksi dengan merancang model sebagai kontrol. Penerapan pada model diperoleh kecepatan rata-rata yaitu 57,9 km/jam.

Katakunci : *Kecepatan Kereta Api, Model Jaringan Kereta Api, Waktu Tempuh, Kontrol Model Prediksi.*

Abstrac

On a railway network systems, railway timetable is very important part of a systems because it involves a very complex. A delay of single train can cause a continuity affect of other trains that cause the scheduling system will experience a very significant change. One solution that is used to minimize the train delay by optimization the speed of train. In this research using methode of model predictice control (MPC) for design model by controlled. The result model implementation is average speed of 57,9 km/hours.

Keyword : *Speed of train, Railway networks model, Train travel, Model Predictive Control*

1. Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu alat transportasi utama di seluruh dunia. Ketepatan waktu (*on time schedule*) merupakan salah satu indikator dari performansi penjadwalan kereta api. Keterlambatan waktu keberangkatan suatu kereta api dapat menimbulkan efek beruntun yang menyebabkan kereta api lain mengalami keterlambatan pada jadwal keberangkatannya. Model dan algoritma untuk menghitung perambatan keterlambatan (*delay propagation*) pada jaringan kereta api dapat dimodelkan sebagai sistem linier didalam Aljabar Max-Plus [1]. Terdapat banyak aturan atau kendala (*constraints*) yang harus dipenuhi, misalnya aturan penyusulan (*overtaking rule*), aturan persilangan (*crossing rule*), aturan jarak antar kereta (*headway*), kecepatan maksimum yang diperbolehkan di suatu jalur, dan sebagainya. Selain kendala-kendala tersebut, jumlah kereta api dan besarnya jumlah jalur atau rute yang harus ditempuh juga menjadi masalah dalam penjadwalan kereta api.

Dengan semakin ketatnya jadwal kereta api yang berangkat dan datang maka diperlukan suatu pengaturan waktu keberangkatan dan kedatangan agar diperoleh hasil

penjadwalan yang optimal. Salah satu solusi yang digunakan yaitu dengan mengoptimalkan kapasitas jalur kereta api [2], variasi penumpang yang memakai jasa pelayanan kereta api dan jarak antar kereta [3]. Pada kondisi normal (tidak ada gangguan) kereta api akan mengikuti jadwal yang telah ditentukan. Tetapi pada kondisi terjadi gangguan (*disturbance*) baik berupa keterlambatan jadwal atau terjadinya kerusakan teknis pada jaringan infrastruktur maka akan terjadi keterlambatan waktu yang lebih besar. Dalam meminimalkan keterlambatan dapat dilakukan dengan pemutusan koneksi kereta lanjutan [4] ataupun dengan penjadwalan ulang dengan pengaturan posisi keberangkatan kereta (*change train order*) [5].

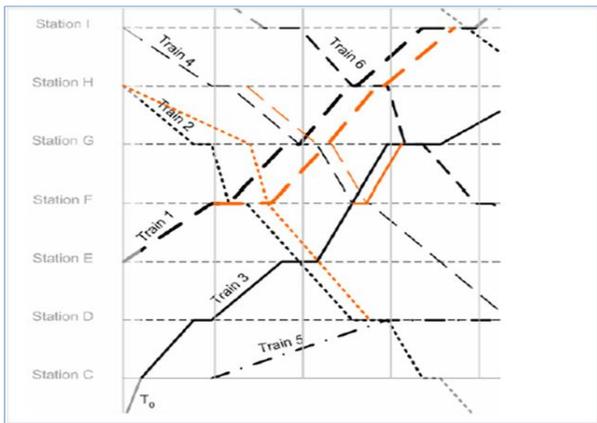
Sistem kereta api dimodelkan dengan menggunakan model Max-Plus Linear yang berdasarkan sistem kejadian diskrit (*discrete event system*). Kontrol Model Prediksi merupakan salah satu strategi kontrol yang menggunakan horison prediksi dalam melakukan optimisasi untuk menghasilkan sinyal kontrol. Dan salah satu keuntungan dari MPC adalah dapat menangani kendala masukan dan keluaran serta selalu diperbaharui baik model ataupun strategi kontrolnya [6].

Pada penelitian ini, fungsi objektif adalah untuk meminimumkan total keterlambatan kereta api dengan menghasilkan sinyal kontrol kecepatan yang digunakan untuk mengatur waktu tempuh perjalanan kereta api dengan menggunakan Kontrol Model Prediksi. Simulasi sistem penjadwalan kereta api menggunakan Program Matlab untuk mendapatkan sinyal kontrol yang optimal.

2. Tinjauan Pustaka

a. Grafik Perjalanan Kereta Api (GAPEKA)

Grafik Perjalanan Kereta Api (GAPEKA) berisi sejumlah jadwal perjalanan kereta api. Gambar 1 menunjukkan suatu GAPEKA yang tersusun dari sumbu horizontal yang menyatakan waktu dan sumbu vertikal menyatakan posisi stasiun.

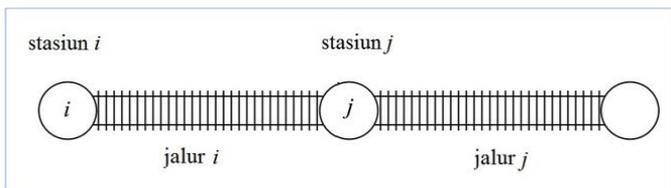


Gambar 1. GAPEKA

Waktu perjalanan yang diperlukan oleh kereta api antara dua stasiun yang terdekat adalah merupakan proyeksi di sumbu horizontal diantara dua waktu, sedangkan kemiringan (*slope*) garis miring menentukan kecepatan dari masing-masing kereta api. Semakin besar *slope* garis miringnya maka semakin besar kecepatan kereta api tersebut.

b. Model Jalur Kereta Api

Didalam sistem jaringan kereta api, penjadwalan mengikuti sistem operasi nominal dengan siklus waktu T (*periode*). Gambar 2 menunjukkan suatu jalur bagian dari jaringan kereta api.



Gambar 2. Jalur Jaringan Kereta Api

Beberapa kendala yang berhubungan dengan waktu keberangkatan kereta dari $x_i(k)$ adalah sebagai berikut [7] :

1. Kendala penjadwalan (timetable constraint)

Kereta api- i tidak berangkat sebelum waktu keberangkatan yang ditentukan oleh GAPEKA.

$$x_i(k) \geq d_i(k) \quad (1)$$

2. Kendala koneksi (connection constraint)

Apabila kereta api- i yang seharusnya memberikan koneksi kepada kereta api- j , maka kereta api- i hanya dapat berangkat jika kereta api- j telah tiba di stasiun- i , sehingga

$$x_i(k) \geq x_j(k - \delta_{i,j}(k)) + a_j(k) + c_{ij}^{min}(k) \quad (2)$$

Dengan $i \in \mathcal{C}_j(k)$, dimana $\delta_{i,j}(k)$ adalah siklus keterlambatan diantara kereta api- i dan kereta api- j pada siklus ke- k .

3. Kendala lanjutan (continuity constraints)

Apabila kereta api- i adalah juga menjadi kereta api- j yang berada di jalur- j

$$x_i(k) \geq x_j(k - \delta_{i,j}(k)) + a_j(k) + s_j^{min}(k) \quad (3)$$

4. Kendala jarak antar kereta (follow constraints) :

Untuk masing-masing $i \in \psi_j(k)$ maka :

$$x_i(k) \geq x_j(k - \delta_{i,j}(k)) + f_j^{min}(k) \quad (4)$$

5. Kendala waktu tunggu (wait constraints) :

Untuk masing-masing $i \in \mathcal{W}_j(k)$ maka :

$$x_i(k) \geq x_j(k - \delta_{i,j}(k)) + a_j(k) + w_j^{min}(k) \quad (5)$$

Sistem kejadian diskrit (*Discrete Event System*) hanya berlaku pada sinkronisasi (*synchronization*) dan tidak ada kejadian yang lain (*no concurrency*), yang dapat dimodelkan menjadi model Aljabar Max-Plus dengan bentuk persamaan :

$$\begin{aligned} x(k) &= A \otimes x(k-1) \oplus B \otimes u(k), \quad x(0) = x_0 \quad (6) \\ y(k) &= C \otimes x(k) \end{aligned}$$

Dengan $A \in \mathbb{R}_\epsilon^{n \times n}$ adalah matriks keadaan, $B \in \mathbb{R}_\epsilon^{n \times m}$ adalah matriks masukan dan $C \in \mathbb{R}_\epsilon^{l \times n}$ adalah matriks output, sedangkan $x(k) \in \mathbb{R}_\epsilon^n$ adalah vektor keadaan, $u(k) \in \mathbb{R}_\epsilon^m$ adalah vektor masukan dan $y(k) \in \mathbb{R}_\epsilon^l$ adalah vektor output.

c. Kontrol Model Prediksi

Konsep kontrol prediksi didasarkan pada ide penggunaan prediksi jarak jauh (*long-range prediction*) dari keluaran proses dalam meminimumkan suatu kriteria tertentu yang kemudian menghasilkan strategi kontrol. Prediksi keluaran proses (y) untuk sejumlah cacah kedepan dilakukan dengan menggunakan suatu persamaan matematis yang diturunkan dari model proses yang akan dikontrol. Selanjutnya dilakukan perhitungan sinyal kontrol (u) yang diperlukan agar prediksi keluaran proses dapat menjejaki suatu deretan harga yang telah ditentukan sebagai sinyal referensi (r). Gambar 3 merupakan strategi kontrol dari Kontrol Model Prediksi.

e. Fungsi Objektif

Fungsi objektif yang dipakai adalah

$$J(k) = J_{out}(k) + \lambda J_{in}(k) \tag{8}$$

Dimana dinamika sistem ditentukan oleh horison prediksi (N_p) dengan periode k sampai $k + N_p - 1$. Fungsi objektif adalah untuk meminimalkan keterlambatan (*delay*) kereta api dengan memberikan sinyal kontrol berupa pengaturan kecepatan yang akan mempengaruhi waktu tempuh kereta api diantara stasiun. Maka fungsi objektif yang digunakan pada optimisasi penjadwalan kereta api ini adalah :

$$\min J_{cost}(k) = \sum_{l=1}^{N_p} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i(k+l|k) - r_i(k+l)| - \lambda \sum_{l=1}^{N_p} \sum_{i=1}^n v_i(k+l-1) \tag{9}$$

Dengan kendala :

$$\hat{x}_j(k+l|k) = \max(d_j(k+l), \hat{x}_i(k+l - \delta_{i,j}(k+l)|k) + a_i^{nom}(k+l) - v_i(k+l) + t_{i,j}^{min}(k+l)) \tag{10}$$

$$v_{i,j}(k+l) \geq 0$$

$$0 \leq v_i(k+l) \leq a_i^{nom}(k+l) - a_i^{min}(k+l)$$

$$v_i(k+l) = v_i(k+N_c-1)$$

Pada semua nilai i, j dan pada $l = 1, \dots, N_p$

Dimana $a_i^{nom}(k)$ adalah waktu tempuh normal dengan menggunakan kecepatan normal dan $a_i^{min}(k)$ adalah waktu tempuh minimal dengan menggunakan kecepatan penuh (*full speed*). Variabel kontrol $v_i(k)$ digunakan untuk memodifikasi waktu tempuh $a_i(k)$ pada jalur- i (jalur dari stasiun- i ke stasiun- j) pada saat siklus waktu- k adalah

$$a_i(k) = a_i^{nom}(k) - v_i(k) \tag{11}$$

4. Hasil Simulasi dan Analisis

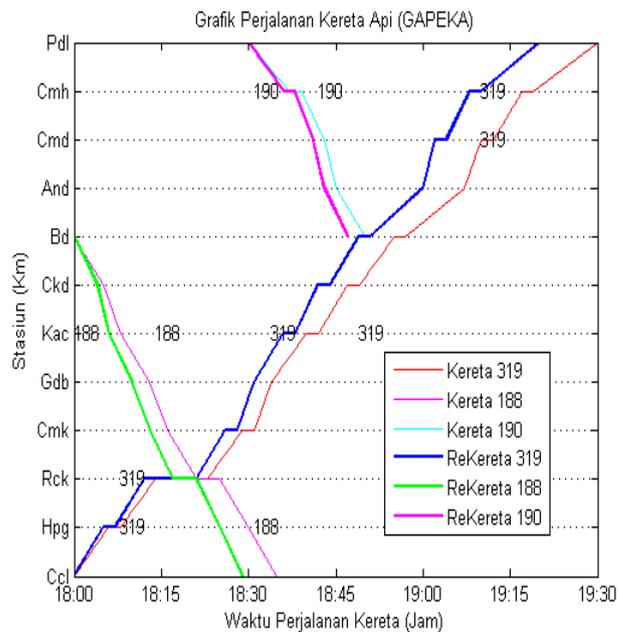
a. Pengujian Model Jaringan Kereta Api

Untuk pengujian pada model jaringan kereta api dapat diberikan uji gangguan baik pada waktu tempuh kereta api antar stasiun atau pada waktu keberangkatan kereta api di setiap stasiun.

Pada pengujian ini diberikan beberapa gangguan berupa keterlambatan waktu keberangkatan di beberapa stasiun yang dipilih agar dapat diamati tentang perambatan keterlambatan dari masing-masing kereta api. Kemudian ditinjau juga hasil sinyal kontrol yang berupa kecepatan yang optimal dari perhitungan yang dilakukan oleh kontrol model prediksi dan selanjutnya dapat direncanakan penjadwalan ulang.

Tabel 1 Data keterlambatan kereta api dan hasil optimisasi

Kereta	Nama Stasiun (Dari - Ke)	Kecepatan Normal (Km/jam)	Waktu Tempuh normal (menit)	Keterlambatan		Kecepatan Optimal (Km/Jam)	Waktu Tempuh Optimal (menit)	
319	Ccl - Hrp	41,2	6	11	2	49,5	5	
	Hrp - Rck	51,7	6	11	2	62,1	5	
	Rck - Cmk	39,3	6	11	2	47,1	5	
	Cmk - Gdb	74,4	3	11	2	85	3	
	Gdb - Kac	52,1	6	11	2	62,5	5	
	Kac - Cth	28,2	5	11	2	35,3	4	
	Cth - Bd	26,4	6	11	2	31,7	5	
	Bd - And	16,4	10	11	2	18,2	9	
	And - Cmd	47,9	3	11	2	71,8	2	
	Cmd - Cmi	36,7	5	5	0	45,8	4	
188	Cmh - Pdl	35,4	11	5	0	38,9	10	
	Bd - Cth	31,7	5	5	0	39,6	4	
	Cth - Kac	47	3	5	0	70,6	2	
	Kac - Gdb	62,5	5	5	0	78,1	4	
	Gdb - Cmk	74,4	3	11	2	85	3	
	Cmk - Rck	47,1	5	11	2	58,9	4	
	Rck - Hrp	62,1	5	11	2	77,6	4	
	Hrp - Ccl	49,5	5	11	2	61,8	4	
	190	Pdl - Cmh	55,6	7	11	2	64,9	6
		Cmh - Cmd	45,8	4	11	2	61,1	3
Cmd - And		71,8	2	11	2	85	2	
And - Bd		32,8	5	11	2	40,9	4	
			46,8	116	212	34	57,8	97



Gambar 4. GAPEKA dengan gangguan keterlambatan

Perubahan yang terjadi pada kereta api setelah diberikan pengaturan kecepatan oleh kontrol model prediksi dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Pengaturan kecepatan oleh kontrol model prediksi

Kereta	Nama Stasiun (Dari - Ke)	Jarak antar stasiun (meter)	Kecepatan Normal (Km/Jam)	Kecepatan Optimal (Km/Jam)			
				X11	X18	X22	X11&X22
319	Ccl - Hrp	4121	41,2	49,5	49,6	49,6	49,6
	Hrp - Rck	5173	51,7	62,1	62,2	62,2	62,2
	Rck - Cmk	3927	39,3	47,1	47,2	47,2	47,2
	Cmk - Gdb	3718	74,4	85	85	85	85
	Gdb - Kac	5208	52,1	62,5	62,6	62,6	62,6
	Kac - Cth	2352	28,2	35,3	35,4	35,4	35,4
	Cth - Bd	2638	26,4	31,7	31,7	31,7	31,7
	Bd - And	2729	16,4	18,2	18,2	18,2	18,2
	And - Cmd	2393	47,9	71,8	72,2	72,2	72,2
	Cmd - Cmi	3055	36,7	45,8	45,9	45,9	45,9
188	Cmi - Pdl	6485	35,4	38,9	39	39	39
	Bd - Cth	2638	31,7	39,6	39,7	39,7	39,7
	Cth - Kac	2352	47	70,6	70,9	70,9	70,9
	Kac - Gdb	5208	62,5	78,1	78,3	78,3	78,3
	Gdb - Cmk	3718	74,4	85	85	85	85
	Cmk - Rck	3927	47,1	58,9	59,1	59,1	59,1
	Rck - Hrp	5173	62,1	77,6	77,8	77,8	77,8
	Hrp - Ccl	4121	49,5	61,8	61,8	61,8	61,8
	Pdl - Cmi	6485	55,6	64,9	65	65	65
	Cmi - Cmd	3055	45,8	61,1	61,3	61,3	61,3
190	Cmd - And	2393	71,8	85	85	85	85
	And - Bd	2729	32,8	40,9	41,1	41,1	41,1
	Kecepatan Rata-rata		46,8	57,8	57,9	57,9	57,9

5. Kesimpulan dan Saran

Kontrol model prediksi dapat digunakan untuk meminimumkan keterlambatan kereta api yang terjadi pada sistem jaringan kereta api. Pengaturan kecepatan kereta api dapat dijadikan salah satu strategi untuk mereduksi perambatan keterlambatan secara signifikan. Kecepatan rata-rata kereta api yang diterapkan pada model jaringan kereta api ini adalah 57,9 km/jam.

Perlu dikaji lebih lanjut mengenai penjadwalan ulang terhadap sistem jaringan kereta api yang lebih kompleks dimana meninjau adanya konflik dengan kereta yang lain. Peninjauan variabel penjadwalan ulang yang lebih banyak (waktu tunggu di stasiun, jarak antar kereta dll).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Goverde Rob,M.P (2010) : A Delay Propagation Algorithm for Large Scale Railway Traffic Network, *Journal of Transportation Research*, 18,269-287.
- [2] Castillo,E., Gallego,I., Urena,J.M., dan Coronado.J.M, (2011) : Timetabling Optimization of a Mixed O Double and Single-Tracked Railway Network, *Journal of Applied Mathematical Modelling*, 35, 859-878.
- [3] Wanderson,O.A.,Millani,A dan Basilio,E.(2002) : Generation of Optimal Schedule for Metrolines using Model Predictive Control, *15th Triennial World Congress*, Barcelona,Spain.
- [4] De Schutter,B., Van den Boom,T, dan Hegyi,A. (2001) : A Model Predictive Control Approach for Recovery

from Delays in Railway Systems, *Transportation Research Record*, no. 1793, pp. 15-20.

- [5] Weiss,N.,Leune,W, Goverde,M.P, Vanden Boom dan De Schutter (2011) : A Permutation Based-Algorithm to Optimally Reschedule Trains in A Railway Traffic Network, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*,Milan,Italy,pp.9537-9542
- [6] Van den Boom,T dan De Schutter,B (2000) : Model Predictive Control for Max-Plus Linear Systems, *Proceeding of the 2000 American Control Conference*,Chicago, Illinois,pp.4046-4050
- [7] Van den Boom dan De Schutter,B.(2004) : Modelling and Control of Railway Networks, *Proceeding of 2004 American Control Conference*, Boston, Massachusetts,17,pp.5728-5733
- [8] De Schutter,B, dan Van den Boom,T. (2000) : MPC for Max-Plus Linier Systems Closed loop Behavior and Tuning, *Proceedings of the Workshop on System with Time-Domain Constraint*, Eindhoven, The Netherlands, pp.18.
- [9] Daerah Operasi (DAOP) 2 Bandung (2011) : Grafiks Perjalanan Kereta Api (GAPEKA) bagian II-1C, *Direktur Jenderal Perkeretaapian*