



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



PERAN SISTEM DAN KONTROL HIBRIDA DALAM TEKNOLOGI REKAYASA: Dari Awal ke Terkini

Profesor Endra Joelianto
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
14 Oktober 2023**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PERAN SISTEM DAN KONTROL HIBRIDA
DALAM TEKNOLOGI REKAYASA:
DARI AWAL KE TERKINI**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PERAN SISTEM DAN KONTROL HIBRIDA DALAM TEKNOLOGI REKAYASA: DARI AWAL KE TERKINI

Prof. Endra Joelianto

14 Oktober 2023
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**PERAN SISTEM DAN KONTROL HIBRIDA DALAM TEKNOLOGI REKAYASA:
DARI AWAL KE TERKINI**

Penulis : Prof. Endra Joelianto

Reviewer : Prof. Yul Yunazwin Nazaruddin

Editor Bahasa : dr. Maria Ekawati Prasetyo, M.T.

Korektor : Dr. Azka Muji Burohman, S.Si., M.T.

Desainer : Danika Laksmi Joelianto, S.Ds.

Cetakan I : 2023

ISBN : 978-623-297-334-3



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Segala puji, hormat, juga syukur bagi Allah Bapa di surga karena tak berkesudahan kasih setia-Nya dan tak habis-habisnya rahmat-Nya, selalu baru tiap pagi. Rahmat dan kasih setia yang senantiasa menguatkan penulis sehingga mampu terus berkarya dan bisa menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini.

Penulis menyampaikan penghargaan, rasa hormat, dan terima kasih kepada seluruh pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung atas dukungan dan arahan yang diberikan kepada penulis sehingga bisa menyampaikan orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB.

Dalam perjalanan panjang pencapaian umat manusia, kita telah menyaksikan bagaimana sistem-sistem yang dirancang dan dikembangkan telah mengubah wajah peradaban dunia. Sejak awal berkembangnya teknologi rekayasa hingga masa modern, evolusi ilmu pengetahuan dan teknologi telah mendorong kita untuk terus berinovasi, menggali lebih dalam, dan lebih memahami cara kita berinteraksi dengan lingkungan dan alam semesta. Naskah ini merupakan sebuah kontribusi yang bermakna bagi pemahaman tentang sistem hibrida dan mekanisme kontrol hibrida. Dari sesuatu yang sederhana seperti alat jam air pada zaman kuno hingga sistem kompleks yang mengatur jaringan global saat ini, naskah memberikan perjalanan menarik melintasi berbagai era dan disiplin ilmu pengetahuan.

Konsep sistem hibrida yang menggabungkan karakteristik diskrit dan kontinu, telah memberikan dasar bagi evolusi baru dalam dunia teknologi. Kombinasi kontrol klasik dengan pendekatan modern melalui mekanisme kontrol hibrida telah membuka pintu baru dalam upaya kita mengontrol sistem yang semakin kompleks dan saling berhubungan. Naskah ditulis dengan rinci menguraikan konsep penting dan studi kasus yang menggambarkan potensi besar metode hibrida dalam mengatasi tantangan terkini.

Penulis ingin menyampaikan penghargaan yang tinggi kepada para pengarang terdahulu atas dedikasi mereka dalam menghasilkan karya-karya yang menjadi dasar dan bagian dari isi naskah ini. Upaya mereka memadukan

perspektif sejarah dengan wawasan teknologi modern telah menghasilkan karya-karya yang bernilai tinggi. Besar keyakinan penulis bahwa naskah ini akan menjadi sumber pengetahuan berharga bagi para pembaca dari berbagai latar belakang, seperti mahasiswa yang haus akan ilmu baru, peneliti yang mencari inspirasi, dan praktisi yang ingin menerapkan konsep inovatif dalam karyanya. Semoga perjalanan intelektual yang ditelusuri dalam naskah dapat menginspirasi pembaca untuk berpikir lebih luas, berkolaborasi lintas disiplin ilmu, dan mendorong inovasi dalam mendekati sistem yang semakin kompleks.

Naskah ini diharapkan dapat memberikan tambahan wawasan berharga, menginspirasi pemikiran kreatif, dan memberikan panduan praktis bagi pembaca dalam memahami dan menerapkan konsep-konsep kompleks tersebut. Dengan wawasan yang diperoleh dari naskah ini, para pembaca diharapkan dapat lebih memahami evolusi sistem kontrol dari masa lalu hingga saat ini dan menerapkan ilmu tersebut dalam berbagai bidang seperti teknologi, sains, dan rekayasa.

Bandung, 14 Oktober 2023

Prof. Endra Joelianto

SINOPSIS

Dalam perjalanan peradaban manusia yang menakjubkan, pencarian akan presisi, kontrol, dan inovasi terjalin bersama dengan evolusi sistem yang dapat ditelusuri kembali mulai dari jam air kuno yang dibuat menggunakan kemampuan logika yang tepat untuk menghasilkan mahakarya rekayasa awal hingga keajaiban teknologi kontemporer yang canggih. Logika rekayasa tersebut di kemudian hari (setelah melewati ribuan tahun) dikenal sebagai sistem beralih (*switching*). Eksplorasi selanjutnya yang dimulai dari seperempat abad yang lalu memperkenalkan sistem beralih sebagai entitas sistem hibrida yang sering muncul dalam berbagai teknologi rekayasa modern, dan mempunyai implikasi mendalam khususnya pada mekanisme sistem kontrol referensi hibrida atau kontrol tingkat lanjut berbasis kecerdasan artifisial. Naskah ini secara ringkas menjembatani kesenjangan antara masa lalu dan masa kini dalam pengembangan dan aplikasi sistem hibrida dan secara khusus sistem beralih.

Dari masa awal pengukuran waktu dengan menggunakan aliran ritme air, hingga sistem digital yang terhubung secara rumit yang mengatur kehidupan kita saat ini, gagasan untuk melakukan peralihan antara keadaan atau modus operasi yang berbeda telah menjadi praktik sehari-hari sebagai bagian adaptasi kehidupan. Sistem beralih, yang dengan cepat melakukan transisi antarmode operasi yang berbeda, telah meletakkan dasar bagi penciptaan struktur hibrida yang kompleks. Sistem ini tidak lagi terbatas pada suatu domain tertentu, mereka mencakup beragam spektrum aplikasi yang luas, mulai dari jaringan listrik yang mengelola beban dinamis hingga sistem robotik yang menavigasi di lingkungan kompleks. Perkembangan sistem kontrol hibrida, sebuah simbiosis kebijaksanaan kontrol klasik dan metodologi kontemporer, menggarisbawahi kontribusi naskah ini dalam menyoroti perpaduan masa lalu dan masa kini.

Di era yang ditandai dengan kemajuan teknologi yang belum pernah terjadi sebelumnya dan upaya terus-menerus untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja, bidang sistem kontrol terus berkembang dengan kecepatan yang luar biasa. Perubahan dan perkembangan teknologi yang pesat karena didorong oleh kecerdasan artifisial sekarang ini menyebabkan teori kontrol

perlu menciptakan pendekatan inovatif yang menjanjikan untuk membentuk ulang peta jalan rekayasa sistem kontrol. Sistem hibrida, yang dicirikan oleh kemampuannya untuk mengintegrasikan dinamika diskrit dan kontinu secara mulus, mewakili perubahan paradigma dalam pemahaman kita tentang kompleksitas dan kemampuan beradaptasi. Seiring berkembangnya lanskap teknologi, sistem hibrida mampu berperan menjadi penghubung antara prinsip-prinsip pengontrolan klasik yang ada dan tuntutan lingkungan kontrol terkini.

Saat pembaca menelusuri bab-bab naskah ini, pembaca diajak untuk menyaksikan perpaduan harmonis antara wawasan teknik, teori matematika, dan kreativitas visioner. Naskah ini disusun untuk memandu pembaca melalui landasan teoretis, menawarkan pengetahuan praktis, dan menyajikan studi kasus yang menunjukkan keserbagunaan dan kekuatan sistem dan kontrol hibrida. Perjalanan karya tercakup dalam naskah ini merupakan bukti dedikasi para pengarang melintasi aspek sejarah, teori, dan aplikasi untuk kemajuan teknologi yang berdampak bagi masyarakat.

Naskah ini bukan sekedar kumpulan ilmu pengetahuan, namun merupakan jembatan yang menghubungkan kecerdikan dan kebijaksanaan para penemu dan pencipta zaman dahulu dengan inovasi para insinyur masa kini, dan menumbuhkan pemahaman holistik tentang sistem hibrida yang melintasi batas waktu dan disiplin. Saat memulai pengembaraan intelektual ini, perjalanan yang dilakukan akan memperkaya pikiran mahasiswa, peneliti, dan praktisi dengan menyadari bahwa belajar dari masa lalu adalah panduan untuk membentuk masa depan. Sistem dan kontrol hibrida telah memperlihatkan bagian perannya terhadap perkembangan teknologi rekayasa dari awal hingga ke terkini.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. SISTEM HIBRIDA ADALAH AWAL REKAYASA	1
1.1 Awal Rekayasa.....	1
1.2 Sistem Hibrida.....	3
2. SISTEM HIBRIDA DENGAN VEKTOR IMPULSIF	6
2.1 Vektor Impulsif	7
2.2 Waktu Transisi Instan.....	7
2.3 Representasi Sistem Hibrida dengan Sistem Impulsif Linier	8
2.4 Sifat-Sifat Dasar.....	10
3. SISTEM HIBRIDA DALAM DUNIA REKAYASA.....	15
3.1 Sistem Tangki Air Paralel	16
3.2 Sistem Dua Tangki Serial	17
3.3 Kontrol Perpindahan Gigi	18
3.4 Pengontrol Gerbang Kereta Api	20
4. ALGORITME LEBAH TANPA SENGAT.....	22
4.1 Kelompok Lebah dan Algoritme	22
4.2 Algoritme Koloni Lebah Buatan	24
4.3 Algoritme Lebah Tanpa Sengat.....	25
4.4 Perbandingan Keberhasilan LTS terhadap KLB	30
5. KONTROL REFERENSI HIBRIDA.....	33
5.1 Kontrol Referensi Hibrida (<i>Hybrid Reference Control</i>)	34
5.2 Kontrol Referensi Hibrida sebagai Sistem Impulsif Linier	35
5.3 Waktu Instan dan Kejadian	39
5.4 Kontrol Referensi Hibrida untuk Perbaikan Respons Transien.....	41
6. KONTROL REFERENSI HIBRIDA DENGAN LOGIKA FUZZY	44
6.1 Kontrol Referensi Hibrida dengan Logika Fuzzy	44
6.2 Perancangan Sistem Fuzzy Sinyal Referensi	46
6.3 Variabel Masukan Sistem Fuzzy Sinyal Referensi	47
6.4 Variabel Keluaran Sistem Fuzzy Sinyal Referensi	47
6.5 Aturan Fuzzy Jika - Maka.....	49
6.6 Simulasi	50
6.7 Implementasi KRH pada Motor-AC	56
6.8 Penelitian Lanjutan KRH berbasis Sistem Kecerdasan	56

7. KONTROL LALU LINTAS PERKOTAAN DENGAN PEMBELAJARAN	
PENGUATAN	58
7.1 Kemacetan dan Rekayasa Lalu Lintas	58
7.2 Algoritme Kontrol Klasik	61
7.3 Pembelajaran Penguatan	64
7.4 Diagram Fundamental Makroskopik	68
7.5 Jaringan Jalan.....	70
7.6 Kontrol Lalu Lintas oleh Algoritme Pembelajaran Penguatan.....	71
8. PENUTUP.....	76
9. UCAPAN TERIMA KASIH.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....	82
CURRICULUM VITAE.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram mekanisme dasar jam air dan <i>clepsydra</i> Ctesibius.....	2
Gambar 1.2	Kerangka kerja tiga lapis	4
Gambar 3.1	Sistem tangki air dan sistem hibrida terkait (Johansson, Egerstedt, Lygeros, & Sastry, 1999)	16
Gambar 3.2	Variabel keadaan diskrit dan respons volume tangki air (Johansson, Egerstedt, Lygeros, & Sastry, 1999)	17
Gambar 3.3	Sistem dua tangki.....	17
Gambar 3.4	Pemodelan sistem hibrida suatu mobil dengan empat roda gigi (Johansson, Lygeros, & Sastry, 2004).....	19
Gambar 3.5	Tuas pemindah roda gigi	19
Gambar 3.6	Diagram kotak roda gigi geser.....	19
Gambar 3.7	Otomaton untuk kereta api, gerbang dan pengontrol (Henzinger, Horowitz, Majumdar, & Wong-Toi, 2000).....	21
Gambar 4.1	Perilaku lebah tanpa sengat (Joelianto, Nainggolan, & Hidayat, 2020	25
Gambar 4.2	Perbandingan angka kinerja KLB (ABC) dan LTS (SBA)	32
Gambar 5.1	Diagram blok dari kontrol referensi hibrida.....	34
Gambar 5.2	Representasi ruang keadaan kontrol referensi hibrida.....	38
Gambar 5.3	Ilustrasi <i>Zeno's paradoxes: The Mind Voyager</i>	40
Gambar 5.4	Ilustrasi satelit di ruang angkasa (Hasil dari kreasi dua gambar di Pixabay).....	41
Gambar 5.5	Kontrol referensi hibrida (a) dua vektor, (b) empat vektor	43
Gambar 6.1	Diagram blok sistem kontrol referensi hibrida berbasis logika fuzzy.....	46
Gambar 6.2	Grafik variabel masukan pada sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan sistem orde satu.....	47
Gambar 6.3	Grafik variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem orde satu.....	48
Gambar 6.4	Grafik variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem orde dua	48
Gambar 6.5	Aturan fuzzy untuk satu masukan pada Rule Editor MATLAB.....	49
Gambar 6.6	Diagram blok Simulink untuk sistem orde satu	50
Gambar 6.7	Diagram blok Simulink untuk sistem orde dua.....	51
Gambar 6.8	Grafik akhir variabel keluaran fuzzy satu masukan pada sistem orde satu.....	51
Gambar 6.9	Grafik akhir variabel keluaran fuzzy satu masukan pada sistem orde dua.....	51
Gambar 6.10	Respons keluaran sistem orde satu dengan pengontrol PID.....	52

Gambar 6.11	Sinyal kontrol $u(t)$ pengontrol PID pada sistem orde satu	53
Gambar 6.12	Respons keluaran sistem orde satu dengan sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan.....	53
Gambar 6.13	Sinyal kontrol $u(t)$ dengan sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan	53
Gambar 6.14	Respons keluaran orde dua dengan pengontrol PID	54
Gambar 6.15	Sinyal kontrol $u(t)$ orde dua dengan pengontrol PID	55
Gambar 6.16	Respons keluaran orde dua sistem kontrol hibrida sinyal referensi berbasis logika fuzzy satu masukan	55
Gambar 6.17	Sinyal kontrol $u(t)$ orde dua sistem kontrol hibrida sinyal referensi berbasis logika fuzzy satu masukan	55
Gambar 6.18	Purwarupa pengontrol KRH Fuzzy dengan pengontrol mikro	57
Gambar 7.1	Kemacetan di Kota Jakarta	59
Gambar 7.2	Lup kontrol lalu lintas	60
Gambar 7.3.	Ilustrasi pendefinisian tekanan (<i>pressure</i>) pada sebuah persimpangan	63
Gambar 7.4	Struktur dasar pembelajaran penguatan	64
Gambar 7.5	Ilustrasi implementasi DQN pada kasus kontrol lalu lintas	65
Gambar 7.6	Grafik 4 wilayah DFM	69
Gambar 7.7a	Tampilan model jaringan dengan 31 persimpangan di Eclipse SUMO.....	71
Gambar 7.7b	Jalur masuk dan jalur keluar kendaraan dari jaringan	71
Gambar 7.8	Perbandingan DFM DQN-epsilon terhadap algoritme klasik.....	72
Gambar 7.9	Perbandingan keluaran DQN-epsilon terhadap kontrol klasik	73
Gambar 7.10	Perbandingan DQN-panjang antrean dan DQN-tekanan.....	74
Gambar 7.11	Kecenderungan penurunan densitas yang diharapkan dari algoritme DQN-panjang antrean dan DQN-tekanan	75

DAFTAR TABEL

Tabel 6.1	Data pengamatan kinerja respons transien	53
Tabel 6.2	Data pengamatan kinerja respons transien	56
Tabel 7.1	Perbandingan properti DFM DQN-epsilon terhadap algoritme klasik	72
Tabel 7.2	Perbandingan properti DFM DQN-panjang antrean dan DQN-tekanan	74

1. SISTEM HIBRIDA ADALAH AWAL REKAYASA

Penciptaan kehidupan artifisial merupakan inti dari pencarian manusia untuk memahami siapa dirinya. Sejak hari-hari awal umat manusia, kehidupan telah diwakili melalui penggunaan teknologi apa pun yang tersedia sesuai dengan era yang dijalani. Hal ini memungkinkan untuk melakukan pengamatan terhadap ciri-ciri kehidupan dari diri sendiri maupun terhadap perangkat yang dapat dikuasai. Dengan cara ini, manusia telah mewujudkan teori tentang prinsip-prinsip vital kehidupan dalam artefak (Levy, 1993; Dorin, 2012).

1.1 Awal Rekayasa

Orang Yunani kuno bisa dikatakan sebagai insinyur pertama yang menerapkan teknologi dengan berbagai kecanggihan untuk tugas menyimulasikan kehidupan. Tiga insinyur Yunani yang terkenal dalam pembuatan perangkat luar biasa adalah Ctesibius dari Aleksandria (fl. 270 SM), Philo dari Bizantium (c. 280-220 SM) dan Hero dari Aleksandria (c. 10-70 M) (Cotterell, Dickson, & Kamminga, 1986; Levy, 1993; Dorin, 2012; Britannica, 2018). Kehebatan Ctesibius dikenal dalam modifikasi *clepsydra* dasar pada jam air (*water clock*) yang mampu mempertahankan tinggi air konstan. Laju aliran keluar dari saluran di bawahnya akan konstan sehingga dapat mengukur waktu yang telah berlalu pada jam air (Cotterell, Dickson, & Kamminga, 1986; Rowland & Howe, 2001; Bunch, Bunch, & Hellemans, 2004; Hwang, Yan, & Lin, 2021). Ctesibius hanya perlu membaca ketinggian air saat naik di bejana silinder bawah, seperti diperlihatkan oleh Gambar 1.1.

Penemuan ini juga menandai Ctesibius sebagai pencipta sistem umpan balik pertama di dalam sejarah sistem kontrol (Mayr, 1970; Pidhayny, 1972; McNown, 1976; Mills, 1982; Lewis, 1992; Lepschy, Mian, & Viaro, 1992; Powers, 2016). Pengontrol umpan balik buatan Ctesibius merupakan tipe beralih (*switching*) dengan fungsi umpan balik $f(h)$ dengan h mewakili ketinggian air dalam bejana yang diwakili persamaan (1.1) (Ozer, 2011).

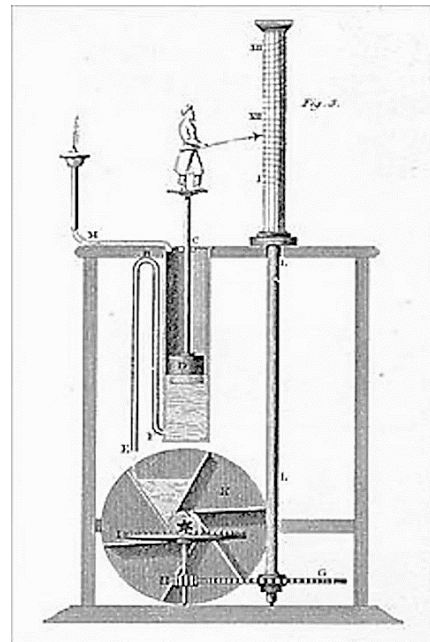
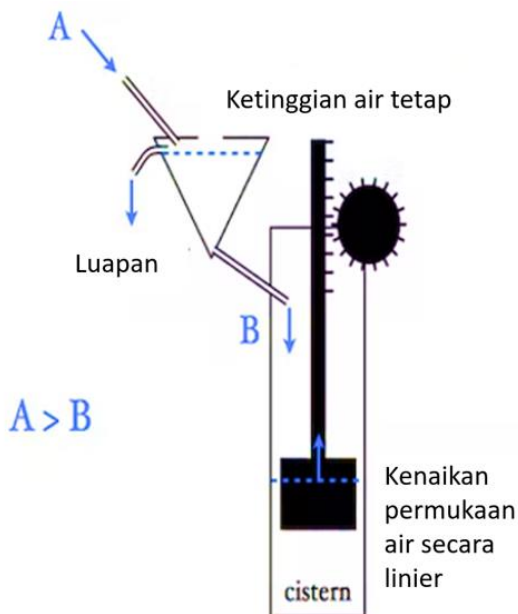


Diagram mekanisme dasar jam air Ctesibius menunjukkan aliran keluar yang konstan dari clepsydra atas yang disalurkan ke tangki bawah yang berisi pelampung yang menggerakkan roda gigi (Dorin, 2012).

Ilustrasi awal abad ke-19 tentang clepsydra Ctesibius dari abad ke-3 SM. Indikator jam naik saat air mengalir masuk. Juga, serangkaian roda gigi memutar silinder agar sesuai dengan jam temporal (Rees, 1970).

Gambar 1.1 Diagram mekanisme dasar jam air dan clepsydra Ctesibius

$$f(h) = \begin{cases} \text{Buka katup,} & h < h_0 \\ \text{Tutup katup,} & h \geq h_0. \end{cases} \quad (1.1)$$

Persamaan ini memperlihatkan tipe beralih dengan batas pemisah dua keadaan oleh persamaan $h = h_0$ yang merupakan kelas khusus dari sistem hibrida (Branicky, 1998; Branicky, Borkar, & Mitter, 1998; Joelianto, 2000; Lunze, 2002; Joelianto & Sutarto, 2009; Saranathan & Grant, 2018). Pengontrolan ketinggian air dalam bejana juga telah banyak diteliti dan dipandang sebagai permasalahan sistem hibrida (Alur dkk., 1995; Lygeros, 2004). Penciptaan rekayasa kontrol pertama pada 2200-an tahun yang lalu untuk pemecahan persoalan kompleks yang terjadi saat itu, hakikatnya diselesaikan dengan menggunakan pendekatan sistem hibrida. Luar biasa sekali bahwa sistem hibrida telah memiliki peran besar dari awal mula perkembangan rekayasa dan kontrol yang ditandai dengan penanggalan mengacu pada Ctesibius pada 270 SM (Lewis, 1992).

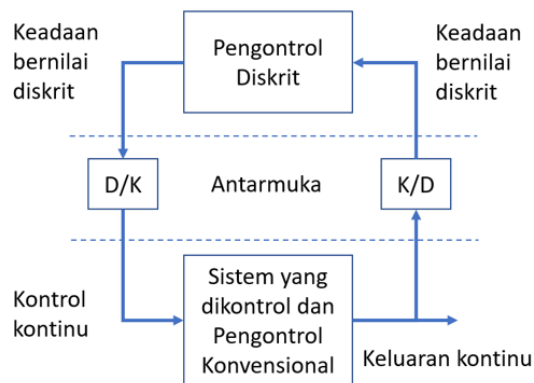
1.2 Sistem Hibrida

Sistem hibrida mengacu pada pemodelan dan analisis sistem yang memiliki variabel keadaan bernilai kontinu dan diskrit yang saling berinteraksi. Variabel keadaan kontinu dapat berupa nilai keadaan dalam waktu kontinu, waktu diskrit, atau campuran keduanya. Model matematis keadaan kontinu dijelaskan oleh persamaan diferensial (*differential equation*) atau diferensi (*difference equation*). Variabel keadaan diskrit umumnya diwakili oleh otomaton digital keadaan terbatas (*finite state digital automaton*) atau sistem transisi masukan/keluaran. Perilaku sistem hibrida dipengaruhi oleh variabel keadaan yang berinteraksi pada suatu kejadian atau waktu (pemicu) yang terjadi setiap kali evolusi sistem memenuhi kondisi tertentu yang kemudian memulai perubahan dalam variabel keadaan (Joelianto & Williamson, 1997; Branicky, Borkar, & Mitter, 1998; Joelianto & Williamson, 2003; Joelianto, 2003).

Sistem fisik sering mengalami gangguan, perubahan kondisi operasi dan kegagalan komponen, dan dalam banyak kasus, perubahan terjadi dalam waktu singkat. Contoh ini dapat ditemukan pada sistem biologi dan sistem mekanik yang mengalami guncangan. Sistem seperti itu dapat dimodelkan dengan persamaan diferensial dan/atau diferensi yang melompat seketika dari satu keadaan ke keadaan lain. Jika tidak ada lompatan pada selang waktu tertentu, maka model matematis dideskripsikan dengan solusi persamaan diferensial dan/atau persamaan diferensi. Analisis perubahan sesaat pada keadaan sistem jauh lebih rumit. Model matematika dari sistem yang mengalami perubahan keadaan sesaat disebut sistem impulsif (Lakshmikantham & Simeonov, 1989; Bainov & Simeonov, 1989; Joelianto, 2003; Joelianto & Williamson, 2003).

Sistem dinamik impulsif dicirikan oleh terjadinya perubahan mendadak dalam keadaan sistem yang terjadi pada saat-saat tertentu selama periode durasi yang dapat diabaikan. Perilaku dinamis dari sistem tersebut lebih kompleks daripada perilaku sistem dinamis tanpa efek impulsif. Kehadiran impuls berarti bahwa lintasan keadaan tidak mempertahankan sifat dasar yang terkait dengan sistem dinamis tidak impulsif, seperti keberadaan (*existence*), keunikan (*uniqueness*), dan kontinuitas (*continuity*) sehubungan dengan kondisi awal. Persamaan diferensial impulsif telah digunakan untuk pemodelan sistem hibrida (Joelianto & Williamson, 2003; Joelianto, 2003).

Sistem kontrol hibrida adalah sistem kontrol dengan pengontrol (*controller*) dan sistem yang dikontrol (*plant*) terdiri atas variabel keadaan kontinu dan diskrit. Kerangka umum yang digunakan untuk kontrol hibrida telah dikembangkan dengan memisahkan komponen sistem menjadi tiga bagian komponen; yaitu sistem yang dikontrol dengan pengontrol konvensional, pengontrol variabel keadaan diskrit, dan antarmuka (Antsaklis, Kohn, Nerode, & Sastry, 1995). Konfigurasi tiga lapis ditunjukkan pada Gambar 1.2. Sistem yang dikontrol dan pengontrol konvensional biasanya dimodelkan dengan persamaan diferensial atau diferensi. Pengontrol variabel keadaan diskrit dirancang melalui proses keputusan berbasis aturan yang mengawasi pengontrol konvensional. Antarmuka memfasilitasi komunikasi antara sistem yang dikontrol dan pengontrol diskrit dan secara bersamaan mengubah variabel keadaan kontinu (K) menjadi keadaan diskrit (D) disingkat sebagai (K/D), dan sebaliknya (D/K). Contoh sistem kontrol hibrida ditemukan dalam kontrol mesin otomotif, sistem jalan raya otomatis, manufaktur fleksibel, kontrol proses kimia, distribusi tenaga listrik, dan jaringan komunikasi komputer (Godbole, 1994; Antsaklis, Kohn, Nerode, & Sastry, 1995; Branicky, 1998).



Gambar 1.2 Kerangka kerja tiga lapis

Kerangka pemodelan untuk sistem hibrida ditujukan untuk membangun model matematis yang cocok untuk analisis dinamik kompleks dan sintesis kontrol menggunakan sistem hibrida. Model yang diusulkan dalam literatur mencerminkan berbagai aplikasi dan pembenaran. Gambaran umum pemodelan sistem hibrida dapat ditemukan pada (Branicky, Borkar, & Mitter, 1998). Dalam referensi tersebut, pendekatan terpadu juga diusulkan yang merupakan generalisasi dari lima model sistem kontrol hibrida yang dikembangkan dari perspektif sistem dan kontrol. Model matematika terpadu

mencoba untuk menangkap semua aspek penting yang mungkin dari variabel bernilai kontinu dan diskrit beserta interaksinya.

Saat ini, ada dua paradigma dalam kerangka teoretis sistem hibrida: agregasi (*aggregation*) dan kelanjutan (*continuation*) (Branicky, Borkar, & Mitter, 1998; Joelianto, 2003). Pendekatan agregasi dapat ditelusuri kembali ke pengembangan awal sistem hibrida dari ilmu komputer dalam konteks teori otomaton. Belakangan, teori sistem menunjukkan bahwa sistem yang kompleks dapat disederhanakan sebagai sistem hibrida di mana kerangka tradisional berurusan dengan variabel keadaan kontinu dari sistem yang mendasarinya. Dalam pendekatan agregasi, variabel keadaan sistem diperlakukan sebagai sistem dinamik kejadian diskrit (atau otomaton terbatas) dengan menggabungkan variabel keadaan bernilai kontinu melalui partisi sel ke sel. Sebuah teori pemetaan sel ke sel sebagai metode global untuk menganalisis sistem tak linier tersedia (Hsu, 2013).

Di sisi lain, pendekatan kelanjutan mengandaikan seluruh sistem dijelaskan oleh persamaan diferensial atau diferensi. Dalam pendekatan ini, variabel keadaan bernilai diskrit dianggap sebagai ketidakpastian atau gangguan, atau disematkan sebagai aksi lompatan (*jump*) dalam persamaan diferensial atau diferensi biasa. Dalam kasus pertama, pengontrol hibrida yang sesuai dapat dirancang menggunakan kontrol robas (*robust control*). Pada kasus kedua, jika lompatan menunjukkan dinamika yang berubah, pengontrol dapat dirancang dengan menggunakan pendekatan desain multi pengontrol atau metode *jump linear quadratic* (JLQ) (Mariton, 1990).

Dalam penerapannya, kemajuan kedua paradigma tersebut terhambat oleh konservatisme yang tertanam dalam metodologi desain (Branicky, Borkar, & Mitter, 1998). Pendekatan agregasi, di satu sisi, sering dihadapkan pada masalah pemilihan metode partisi yang tepat dan beberapa kemungkinan pilihan untuk keadaan berikutnya kapan saja (*non determinisme of automata*) yang menyebabkan ketidakpastian dan kompleksitas komputasi. Di sisi lain, pendekatan kelanjutan seringkali dibatasi oleh kompromi persyaratan desain yang ditemukan dalam desain kontrol konvensional. Dengan demikian, verifikasi diperlukan ketika pengontrol yang dihasilkan dari satu pendekatan diimplementasikan dalam sistem nyata. Upaya mewujudkan desain terpadu untuk pengontrol bernilai kontinu dan diskrit masih dilakukan terus menerus.

2. SISTEM HIBRIDA DENGAN VEKTOR IMPULSIF

Ada dua pendekatan utama untuk mempelajari perilaku sistem diferensial impulsif. Pendekatan pertama menggunakan fungsi umum untuk merepresentasikan diskontinuitas lompatan dalam keadaan dengan bantuan fungsi Dirac. Pendekatan ini dikembangkan oleh Halanay & Wexler (1971). Dalam pendekatan kedua, diskontinuitas lompatan diwakili oleh vektor impulsif yang diprakarsai oleh Milman & Myshkis (1960) yang menghasilkan kestabilan pertama kali dan dikembangkan lebih lanjut dalam (Lakshmikantham & Simeonov, 1989; Bainov & Simeonov, 1989) dan referensi yang dikutip di dalamnya.

Representasi vektor impulsif memberikan karakterisasi umum dari gangguan eksternal, perturbasi, atau bahkan kontrol impulsif. Persamaan diferensial biasa impulsif yang menarik adalah yang dicirikan oleh sistem linier. Persamaan ini disebut sebagai persamaan diferensial impulsif linier (*linear impulsive differential*), atau hanya sebagai sistem impulsif linier (SIL) (*linear impulsive system (LIS)*) (Joelianto & Williamson, 1998c; Joelianto & Williamson, 2002; Joelianto, 2003; Joelianto & Williamson, 2003; Jiang & Yang, 2009; Boichuk, Langerová, & Škoríková, 2010).

Tinjau suatu sistem invarian waktu linier kontinu berorde minimal dengan variabel keadaan $x(t) \in R^n$, keluaran $y(t) \in R^l$, dan masukan $u(t) \in R^m$ yang dikenai vektor impulsif $\{d(t_k) : k \in Z^+\}$ dengan Z^+ adalah himpunan bilangan integer positif pada variabel keadaan sistem seperti yang diberikan oleh

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \\ x(t_k^+) &= x(t_k) + d(t_k); \quad t \geq 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

dengan waktu t_k adalah waktu instan (*time instant*) dan nilai vektor impulsif $d(t_k)$ tidak diketahui. Vektor impulsif dapat mewakili gangguan eksternal, kegagalan komponen sistem atau kontrol impulsif.

Penyelesaian sistem dengan efek impulsif (2.1) dalam ruang keadaan yang diperluas dimulai dari kondisi awal (t_0, x_0) dan bergerak sepanjang lintasan

$(t, x(t))$. Jika pada saat instan $t_k \geq t_0$ terjadi lompatan impulsif $d(t_k)$, maka keadaan seketika berubah menjadi keadaan baru $x(t_k^+) = x(t_k) + d(t_k)$. Keadaan kemudian mengikuti lintasan dengan kondisi awal yang baru $x(t_k^+)$ hingga terjadinya transisi waktu instan berikutnya pada waktu t_{k+1} . Solusi sistem impulsif dicirikan oleh tiga komponen:

- dinamika persamaan diferensial biasa $x(t)$,
- waktu transisi instan t_k , dan
- vektor impulsif $d(t_k)$.

2.1 Vektor Impulsif

2.1.1 Vektor Impulsif Lup Terbuka

Dalam hal ini, vektor impulsif $d(t_k)$ adalah vektor sebarang dalam ruang riil berdimensi n dinyatakan dengan R^n yang terjadi pada waktu t_k , $k \in Z^+$, yang tidak bergantung pada keadaan atau keluaran sistem. Vektor impulsif lup terbuka ini muncul dalam model matematika sistem fisik sebagai akibat dari: gangguan eksogen, kegagalan komponen sistem atau kontrol impulsif lup terbuka. Aplikasi kontrol impulsif lup terbuka dapat ditemukan pada manajemen obat dalam tubuh manusia (Pierce & Schumitzky, 1976) dan masalah lintasan ruang optimal (Carter & Brient, 1995).

2.1.2 Vektor Impulsif Lup Tertutup

Dalam hal ini, vektor impulsif $d(t_k)$ bergantung pada keadaan atau keluaran sistem, dan dapat ditulis dalam bentuk $d(t_k) = \psi x(t_k)$ dengan ψ adalah matriks konstan atau matriks berubah terhadap waktu. Jenis vektor impulsif ini biasanya ditemukan dalam pengontrolan perilaku sistem linier di mana informasi tentang sistem digunakan untuk mempengaruhi lintasan. Aplikasi vektor impulsif lup tertutup dapat ditemukan pada sistem modulasi frekuensi pulsa yang ditelaah oleh Pavlidis (1966).

2.2 Waktu Transisi Instan

Waktu transisi instan didefinisikan sebagai waktu ketika vektor impulsif terjadi. Terjadinya vektor impulsif mungkin merupakan hasil dari gangguan

eksternal, kegagalan komponen sistem, jam waktu, atau keputusan logis. Waktu instan juga mendefinisikan sebagai waktu *kejadian* atau *pemicu* yang mewakili diskontinuitas dalam keadaan sistem. Selain itu, suatu kejadian dapat digunakan untuk menyebabkan kejadian lain di masa mendatang. Mengikuti terminologi dari Andersson (1993), waktu instan akan diklasifikasikan dalam dua cara.

2.2.1 Waktu Instan Terjadwal

Urutan waktu instan yang dijadwalkan diberikan oleh

$$t_k = t_{k-1} + \tau_k; \tau_k > 0 \quad (2.2)$$

dengan nilai τ_k diketahui apriori untuk semua $k \in \mathbb{Z}^+$. Dalam kasus yang paling sederhana, $\tau_k = \tau$ adalah konstan dengan $k \in \mathbb{Z}^+$ yang mengarah ke waktu instan yang seragam. Hal ini serupa dengan pengambilan cacah yang seragam dalam sistem digital.

2.2.2 Waktu Instan yang Terkondisi

Waktu instan terkondisi terjadi jika waktu t atau variabel keadaan $x(t)$ memenuhi kondisi tertentu. Kondisi dapat didefinisikan, misalnya, sebagai

- $t_k = \{t : \zeta(t) = \varepsilon, t \in \mathbb{R}^+\}$ atau
- $t_k = \{t : \zeta(x(t)) = \varepsilon, (t, x(t)) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n\}$.

Sebagai alternatif, kondisi juga dapat diberikan dalam bentuk himpunan oleh

- $S \subset \mathbb{R}^n$ dengan $t_k = \{t : x(t) \in S, S \subset \mathbb{R}^n\}$.

2.3 Representasi Sistem Hibrida dengan Sistem Impulsif Linier

Pemodelan sistem impulsif linier (SIL) dapat diperluas untuk mencakup masalah sistem dengan dinamika beralih yang umumnya ditemukan dalam desain sistem kontrol hibrida (Joelianto, 2003). Perkembangan utama dari sistem dinamik impulsif adalah untuk menangkap perilaku lompatan keadaan sesaat dari sistem dinamik. Namun, vektor impulsif juga dapat digunakan untuk menggambarkan sistem dinamik yang terkena keluaran dari model berorde tinggi.

Dari perspektif sistem dan kontrol, biasanya desain dilakukan dengan menggunakan pendekatan kelanjutan (*continuation approach*), karena desain sistem kontrol membutuhkan evolusi yang dapat dilacak untuk sintesis dan penilaian pengontrol. Dalam hal variabel diskrit, model kelanjutan (*continuation model*) dapat dicirikan sebagai berikut:

- Peralihan otonom (atau terkontrol): Bidang vektor dari dinamika kontinu berubah secara terputus-putus (*discontinuously*) ketika keadaan memenuhi beberapa kendala.
- Impuls otonom (atau terkontrol): Keadaan sistem melompat secara terputus-putus pada pemenuhan beberapa kendala yang diberikan.

Dalam praktiknya, kemungkinan besar hanya ada satu jenis variabel diskrit. Jika kedua jenis tersebut ada, sistem memiliki apa yang disebut pemodelan kekuatan penuh (*full power*) dari sistem hibrida (Branicky, Borkar, & Mitter, 1998). Sebagai ilustrasi, Joelianito (2003) telah mengkaji dinamika sistem yang terdiri dari peralihan antara dua sistem dinamik mengikuti

$$\dot{x}(t) = A_i x(t); i = 1, 2. \quad (2.3)$$

Sistem beralih (2.3) dapat dituliskan dalam bentuk SIL sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{z}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \quad (2.4a)$$

$$\begin{bmatrix} z_1(t_k^+) \\ z_2(t_k^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1(t_k) \\ z_2(t_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1(t_k) \\ d_2(t_k) \end{bmatrix} \quad (2.4b)$$

$$x(t) = z_1(t) + z_2(t) \quad (2.4c)$$

dengan salah satu $d_1(t_k) = -z_1(t_k)$ atau $d_2(t_k) = -z_2(t_k)$ pada (2.4b). Pilihan vektor keputusan ini kemudian menyiratkan bahwa salah satu $x(t) = z_1(t_k)$ atau $x(t) = z_2(t_k)$ untuk $t_k < t \leq t_{k+1}$. Pemodelan sistem beralih melalui sistem dengan representasi efek impulsif pertama kali diamati oleh Branicky, Borkar, & Mitter (1998). Peralihan otonom dapat dilihat sebagai kasus khusus impuls otonom dengan menanamkan keadaan diskrit ke dalam keadaan kontinu yang lebih besar melalui properti ekstensi universal dari ruang fase R^n (Munkres, 1975).

Penelitian terbaru tentang desain kontrol hibrida terkait dengan masalah sistem kontrol dengan dinamika beralih masih berlangsung saat ini. Sejauh ini, sedikit perhatian telah diberikan pada masalah sistem yang mengalami perubahan keadaan seketika. Kemampuan persamaan diferensial impulsif untuk menangkap pemodelan sistem beralih dapat memberikan kerangka kerja terpadu untuk penanganan sistem hibrida, dan mempromosikan arah baru dalam menganalisis dan mensintesis sistem kontrol hibrida.

2.4 Sifat-Sifat Dasar

Persamaan diferensial impulsif pada dasarnya adalah persamaan diferensial sepotong-sepotong di mana diskontinuitas pada keadaan sistem disebabkan oleh lompatan dalam solusi. Sebagian besar hasil teori persamaan diferensial biasa impulsif telah dikembangkan di referensi berikut (Lakshmikantham & Simeonov, 1989; Bainov & Simeonov, 1989) dan referensi yang dikutip di dalamnya. Meskipun demikian, penelitian masih terbatas pada kasus di mana vektor impulsif memiliki representasi lup tertutup.

2.4.1 Keberadaan dan Keunikan Solusi

Misal $\Omega \subset R^n$ adalah suatu himpunan terbuka, dan mempertimbangkan bentuk SIL

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); & t \neq t_k \\ x(t_k^+) &= x(t_k) + d(t_k); & t = t_k \\ x(t_0^+) &= x_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

dengan solusi $x(t) = x(t; t_0^+, x_0) \in \Omega$ untuk $t \geq t_0$. Vektor impulsif $d(t_k)$ dengan waktu instan t_k , untuk masing-masing $k \in Z^+$, didefinisikan dalam domain Ω yang berisi himpunan

$$\zeta = \{(t, x) \in R \times \Omega : t_k^+ < t \leq t_{k+1}, \forall k \in Z^+, x \in \Omega\}. \quad (2.6)$$

- Sistem Impulsif Linier Otonom

Sistem (2.5) disebut sistem otonom jika $Bu(t) = 0$ untuk semua $t \geq 0$ dan $x \in R^n$.

- Sistem Impulsif Linier Tidak Otonom

Sistem (2.5) disebut sistem tidak otonom jika terdapat $t \geq 0$ dan $x \in R^n$ sedemikian sehingga $Bu(t) \neq 0$.

Perhatikan bahwa kondisi awal $x(t_0^+) = x_0$ digunakan daripada $x(t_0) = x_0$. Jika waktu t_0 sesuai dengan waktu transisi sesaat maka $x(t_0^+)$ dipahami sebagai kondisi awal dari persamaan diferensial biasa. Evolusi waktu dari sistem impulsif linier terdiri dari fungsi kontinu dan melompat tidak kontinu.

Kondisi 1 (Joelianto, 2003)

Misal Ω adalah suatu himpunan terbuka dengan $\Omega \subset R^n$ dan

1. $0 \equiv t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots$
2. $d(t_k)$ adalah vektor impulsif terbatas sehingga $x(t_k^+) = x(t_k) + d(t_k) \in \Omega$.

Maka himpunan ς_k yang tidak kosong didefinisikan oleh

$$\varsigma_k = \{(t, x) \in R \times \Omega : t_k < t \leq t_{k+1}, \forall k \in Z^+ \text{ dan } x \in \Omega\}. \quad (2.7)$$

Solusi x dari (2.5) adalah kontinu dari kiri pada setiap selang $(t_k, t_{k+1}]$ dan memiliki limit kanan dan limit kiri, $x(t_k^+)$ dan $x(t_{k+1})$ berturut-turut. Himpunan ini mendefinisikan solusi sistem impulsif di setiap wilayah $(t_k, t_{k+1}) \times \Omega$. Sehingga $\varsigma = \bigcup_k \varsigma_k$.

Keberadaan vektor impulsif $d(t_k)$ pada waktu t_k berarti bahwa sistem impulsif (2.5) adalah tidak otonom. Untuk sembarang waktu $t > t_m > 0$, solusi $x(t) = x(t; t_0^+, x_0)$ dapat ditulis dalam bentuk integral

$$\begin{aligned} x(t; t_0^+, x_0) = & e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\sigma)} Bu(\sigma - t_0) d\sigma \\ & + \int_{t_0}^t e^{A(t-\sigma)} \sum_{k=0}^m d(t_k) \delta(\sigma - t_k) d\sigma. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Persamaan transisi (2.8) memberikan keadaan $x(t)$ pada waktu t dalam bentuk keadaan $x(t_0)$ pada waktu t_0 , masukan selama interval waktu $[t_0, t)$ dan runtun vektor impulsif $\{d(t_k)\}$ yang terjadi pada waktu instan t_k , $k = 0, 1, \dots, m$ dengan $0 \equiv t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m < t$. Keunikan solusi diberikan

oleh teorema berikut yang mengikuti langsung dari keberadaan dan keunikan solusi persamaan diferensial biasa (PDB) linier (*ordinary differential equation*), misal seperti yang diberikan oleh Coddington & Levinson (1955).

Teorema 1 (Joelianto, 2003)

Tinjau sistem impulsif invarian waktu linier (2.5). Misalkan Kondisi 1 berlaku. Kemudian untuk nilai awal yang diberikan $(t_0, x_0) \in \zeta$, terdapat solusi unik yang diberikan oleh persamaan (2.8) yang terdefinisi untuk semua $t \in R$.

2.4.2 Kontinuitas Solusi

Tidak seperti persamaan diferensial biasa, kontinuitas dari solusi (2.8) dengan kondisi awalnya tidak bisa dijamin hanya oleh kondisi awal $x(t_0^+) = x_0$. Solusi persamaan (2.8) dengan kondisi awal $x(t_k^+)$ pada interval $(t_k, t_{k+1}]$ diberikan oleh

$$x(t) = e^{A(t-t_k)}x(t_k^+) + \int_{t_k}^t e^{A(t-\sigma)}Bu(\sigma - t_k)d\sigma. \quad (2.9)$$

Solusi mengikuti permasalahan kondisi awal PDB untuk setiap interval $(t_k, t_{k+1}]$. Untuk kasus kejadian yang terjadi pada waktu instan $\{t_k\}$ sedemikian rupa sehingga

$$0 \equiv t_0 < t_1 < \dots < t_k < t_{k+1} < \dots \quad (2.10)$$

keberadaan solusi seperti pada (2.8) dijamin. Namun, masalah dapat muncul ketika kondisi (2.10) tidak dapat dijamin. Artinya, misalkan kondisi awal $x(t_0^+) = x_0$ pada saat t_0^+ tidak berada di *hyperplane* $\zeta_j(x(t))$. Misalkan juga pada saat waktu instan t_j yang memenuhi kondisi

$$t_j = \{t : \zeta_j(x(t)) = \varepsilon, (t, x(t)) \in R^+ \times R^n\}, \quad (2.11)$$

solusi (t_j, x_j) bertemu dengan *hyperplane* $\zeta_j(x(t))$ sehingga solusi $(t_j^+, x(t_j^+))$ terletak pada *hyperplane* $\zeta_j(x(t))$. Oleh karena itu, bagian dari solusi pada interval $t_j < t \leq t_{j+1}$ juga merupakan solusi dari interval $t_j \leq t \leq t_{j+1}$.

Sebagai contoh, misalkan keluaran sistem yang dikontrol dari SIL (2.5) diberikan oleh

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.12)$$

dan waktu instan transisi t_k ditentukan oleh kondisi

$$c_m^T x(t_k) = \delta_m \quad (2.13)$$

dengan c_m^T adalah baris ke- m dari C di (2.12). Kemudian dari (2.5), $c_m^T d(t_k) = 0$ menyiratkan $c_m^T x(t_k^+) = \delta_m$ dalam hal ini solusi SIL tidak meninggalkan *hyperplane* di $t = t_k$. Secara matematis, hal ini berarti solusi x untuk $t > t_k$ tidak terdefinisi. Selain itu, jika $c_m^T d(t_l) = 0$, $\forall l > k$, maka solusi juga tidak dapat diteruskan ke kanan dari $t > t_k$.

Jika $c_m^T d(t_k) = 0$, pertanyaan keberadaan dapat diselesaikan (Anderson & Moore, 1971) dengan mengasumsikan bahwa penundaan waktu kecil Δt yang tepat terjadi antara terjadinya suatu kejadian pada waktu t_k dan perubahan keadaan model pada waktu t_k^+ sedemikian rupa sehingga lintasan bergerak dari *hyperplane* sebelum beralih. Artinya, misalkan $t_k^+ = t_k + \Delta t$ dan

$$c_m^T e^{A\Delta t} x(t_k) \neq \delta_m. \quad (2.14)$$

Kemudian, variabel keadaan mengikuti persamaan

$$x(t_k^+) = x(t_k + \Delta t) + d(t_k) = e^{A\Delta t} x(t_k) + d(t_k). \quad (2.15)$$

Sehingga $c_m^T d(t_k) = 0$ menyiratkan

$$c_m^T x(t_k^+) = c_m^T e^{A\Delta t} x(t_k) \neq \delta_m. \quad (2.16)$$

Cara lain untuk menghindari kemungkinan (matematis) tidak adanya solusi adalah dengan memaksakan kendala pada vektor keputusan sehingga $c_m^T d(t_k) \neq 0$.

Masalah ketiadaan juga dapat diselesaikan dengan menggunakan apa yang disebut kondisi pemukulan (*beating*) yang umumnya diasumsikan dalam studi sistem dinamik impulsif (Lakshmikantham & Simeonov, 1989; Bainov & Simeonov, 1989). Kondisi pemukulan mengasumsikan bahwa solusi memenuhi satu *hyperplane* tidak lebih dari satu kali untuk menjamin keberadaan solusi. Alih-alih, di sini diasumsikan bahwa solusi akan (pada

akhirnya) meninggalkan *hyperplane* begitu solusi mencapainya, mungkin menghindari terjadinya vektor impulsif dengan cepat. Hal ini dikenal sebagai teori *chattering* dalam kontrol.

Lebih khusus, diberikan solusi $x(t)$ dari (2.8) yang didefinisikan pada $[t_0, t_0 + \alpha)$ dengan $\alpha > 0$, suatu solusi $\tilde{x}(t)$ merupakan kelanjutan ke kanan dari $x(t)$ jika, untuk $\beta > \alpha$, solusi $\tilde{x}(t)$ didefinisikan pada $[t_0, t_0 + \beta)$ dan $x(t) = \tilde{x}(t)$ untuk semua $[t_0, t_0 + \alpha)$. Jika $x(t)$ terdefinisi pada interval $[t_0, t_0 + \alpha)$ dan tidak ada kelanjutan yang mungkin untuk $t > t_0 + \alpha$, maka interval $[t_0, t_0 + \alpha)$ tersebut disebut keberadaan maksimal dari solusi $x(t)$.

Misalkan $J^+(t_0^+, x_0)$ adalah interval maksimal dari (t_0^+, ω) dengan solusi $x(t; t_0^+, x_0)$ terdefinisi. Hasil berikut adalah perumusan ulang kondisi pada (Lakshmikantham & Simeonov, 1989; Bainov & Simeonov, 1989) yang merangkum kesinambungan solusi sistem impulsif linier.

Teorema 2 (Joelianto, 2003)

Tinjau sistem impulsif linier (2.5). Misalkan kondisi

1. $0 \equiv t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$, dan
2. $x(t) \in Q$ untuk $t \in J^+(t_0^+, x_0)$ dengan Q adalah himpunan bagian kompak dari Ω terpenuhi.

Maka $J^+(t_0^+, x_0) = (t_0^+, \infty)$.

3. SISTEM HIBRIDA DALAM DUNIA REKAYASA

Sistem hibrida muncul dalam banyak teknologi rekayasa yang dicirikan oleh pengambilan keputusan bersifat logika dan aksi kontrol tergabung dengan proses fisik kontinu (Antsaklis, Kohn, Nerode, & Sastry, 1995; Lunze & Lamnabhi-Lagarigue, 2009; Heemels, De Schutter, Lunze, & Lazar, 2010). Model matematika yang menghubungkan dinamika logika dan komponen diskrit sistem dengan dinamika bagian kontinu sistem diperlukan untuk menangkap evolusi sistem. Model matematika ini telah berevolusi dengan segala macam variasi, namun pada dasarnya terdiri dari beberapa bentuk persamaan diferensial atau diferensi di satu sisi dan otomaton atau model kejadian diskrit lainnya di sisi lain.

Kumpulan teknik analisis dan sintesis berdasarkan model ini membentuk bidang penelitian teori sistem hibrida, yang telah memainkan peran penting dalam desain multidisiplin banyak sistem teknologi di sekitar kita. Teori sistem hibrida juga menggabungkan ide-ide yang berasal dari disiplin ilmu komputer dan rekayasa perangkat lunak di satu sisi, dan teori sistem dan rekayasa kontrol di sisi lain. Karakter campuran ini menjelaskan terminologi sistem hibrida, yang pertama kali digunakan dalam konteks ini oleh Witsenhausen pada tahun 1966 (Witsenhausen, 1966) sebagaimana tercantum dalam referensi (Lunze & Lamnabhi-Lagarigue, 2009).

Pada sistem hibrida, variabel keadaan kontinu dapat berupa nilai keadaan dalam waktu kontinu, waktu diskrit, atau campuran keduanya dengan model matematika dijelaskan oleh persamaan diferensial atau diferensi. Variabel keadaan diskrit umumnya diwakili oleh otomaton (*automaton*) digital keadaan terbatas atau sistem transisi masukan/keluaran. Perilaku sistem hibrida dipengaruhi oleh variabel keadaan yang berinteraksi pada suatu pemicu kejadian (*event*) atau waktu (*time*) yang terjadi setiap kali evolusi sistem memenuhi kondisi tertentu yang kemudian memulai perubahan dalam perilaku dinamik, variabel keadaan atau keduanya (Branicky, Borkar, & Mitter, 1998; Joelianto, 2003). Bagian ini ditujukan untuk memberikan beberapa contoh proses fisik yang merupakan sistem hibrida dengan model matematikanya.

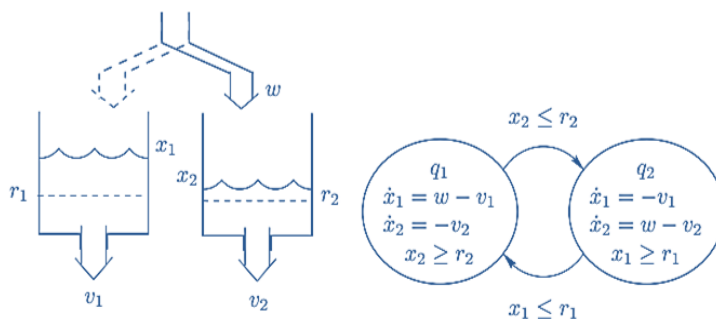
3.1 Sistem Tangki Air Paralel

Sistem dua tangki air ditunjukkan pada Gambar 3.1 (Johansson, Lygeros, & Sastry, 2004). Untuk $i = \{1, 2\}$, misalkan x_i menyatakan volume air dalam Tangki- i dan $v_i > 0$ menunjukkan konstanta aliran air keluar dari Tangki- i . Misal w menunjukkan aliran konstan air ke dalam sistem, secara eksklusif untuk Tangki-1 atau Tangki-2 pada setiap waktu instan. Tujuannya adalah untuk menjaga volume air masing-masing bernilai di atas r_1 dan r_2 , dengan asumsi bahwa volume air di atas r_1 dan r_2 pada awalnya.

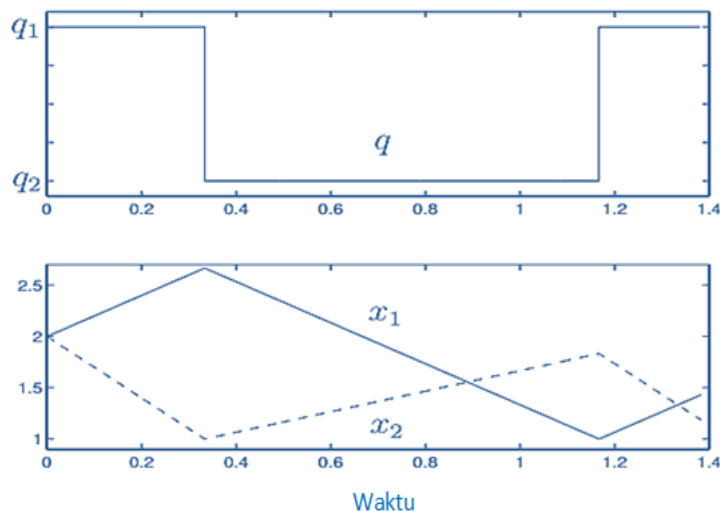
Hal ini ingin dicapai oleh pengontrol yang mengalihkan aliran masuk dengan aturan sebagai berikut:

- ke Tangki-1 setiap kali $x_1 \leq r_1$ dan
- ke Tangki-2 setiap kali $x_2 \leq r_2$.

Sistem tangki air diwakili oleh sistem hibrida pada Gambar 3.1. Misal pada waktu awal $x_1 > r_1$ dan $x_2 > r_2$, aliran masuk jika diarahkan ke Tangki-1. Keadaan diskrit q dari sistem sama dengan q_1 . Kemudian, keadaan kontinu mengalir sesuai persamaan diferensial dengan keadaan q_1 pada Gambar 3.1. Ketika kondisi $x_2 \leq r_2$ ditentukan pada tepi (*edge*), transisi diskrit terjadi. Keadaan kembali mengalir menurut keadaan q_2 dan seterusnya. Lintasan memiliki satu komponen kontinu x dan satu komponen diskrit q yang disebut eksekusi atau solusi dari sistem hibrida. Sebuah eksekusi sistem hibrida ditunjukkan pada Gambar 3.2. Jika $\max(v_1, v_2) < w < v_1 + v_2$, intuisi fisik menunjukkan setidaknya salah satu tangki air akhirnya akan mengering. Hal ini menghasilkan akumulasi dari lompatan-lompatan yang dikenal sebagai fenomena Zeno (Johansson, Egerstedt, Lygeros, & Sastry, 1999).



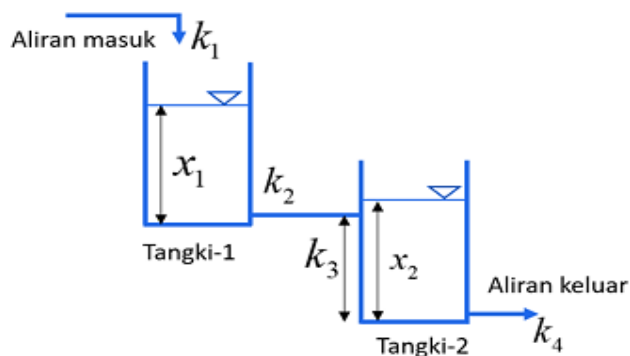
Gambar 3.1 Sistem tangki air dan sistem hibrida terkait (Johansson, Egerstedt, Lygeros, & Sastry, 1999)



Gambar 3.2 Variabel keadaan diskrit dan respons volume tangki air (Johansson, Egerstedt, Lygeros, & Sastry, 1999)

3.2 Sistem Dua Tangki Serial

Sistem dua tangki serial dibahas oleh Stursberg, Kowalewski, Hoffmann, & Preußig (1997) dalam (Henzinger, Horowitz, Majumdar, & Wong-Toi, 2000) diperlihatkan oleh Gambar 3.3. Sistem yang dikontrol ini terdiri dari dua tangki identik yang saling terkoneksi. Pada Tangki-1 mengalir sebuah aliran yang dicirikan oleh parameter kerugian k_1 karena gesekan. Aliran pada saluran keluar Tangki-1, dicirikan oleh parameter kerugian k_2 , mengalir ke Tangki-2. Tangki-1 berada k_3 meter di atas Tangki-2. Aliran keluar Tangki-2 dicirikan oleh parameter kerugian k_4 .



Gambar 3.3 Sistem dua tangki

Misal x_1 dan x_2 menyatakan tinggi kolom cairan dalam Tangki-1 dan Tangki-2, dinamika sistem dua tangki serial didapatkan dengan menerapkan hukum Toricelli sebagai berikut (3.1).

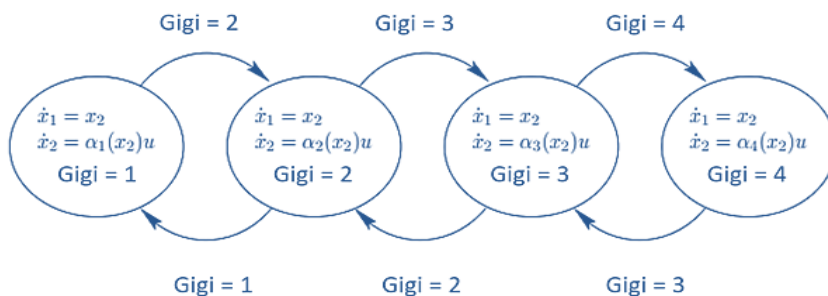
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} k_1 - k_2\sqrt{x_1(t) - x_2(t) + k_3} \\ k_2\sqrt{x_1(t) - x_2(t) + k_3} - k_4\sqrt{x_2(t)} \end{bmatrix} & \text{jika } x_2(t) > k_3 \\ \begin{bmatrix} k_1 - k_2\sqrt{x_1(t)} \\ k_2\sqrt{x_1(t)} - k_4\sqrt{x_2(t)} \end{bmatrix} & \text{jika } x_2(t) \leq k_3. \end{cases} \quad (3.1)$$

Ketika tinggi cairan dalam Tangki-2 sama dengan tinggi pipa penghubung, persamaan dinamika sistem mulai beralih mengikuti persamaan (3.1). Pada kondisi dinamika ini, sistem bergerak menuju titik kesetimbangan untuk semua $x_i > 0$ dan $\forall k_i > 0$ dengan $i = 1, 2, 3, 4$. Misal digunakan nilai parameter $k_2 = k_4 = 1$, $k_1 = 0,75$ meter per detik dan $k_3 = 0,5$ meter, ketinggian dari sistem tangki akan bergerak menuju titik kesetimbangan $x_1 = 0,625 \dots$, $x_2 = 0,563 \dots$ (Stursberg, Kowalewski, Hoffmann, & Preußig, 1997; Henzinger, Horowitz, Majumdar, & Wong-Toi, 2000).

3.3 Kontrol Perpindahan Gigi

Sistem kontrol perpindahan gigi (*gear shift control*) menjelaskan masalah desain kontrol kontinu dan diskrit perlu ditentukan bersamaan (Johansson, Lygeros, & Sastry, 2004). Gambar 3.4 memperlihatkan suatu model mobil dengan kotak roda gigi (*gear box*) memiliki empat roda gigi dengan ilustrasi tuas pemindah pada Gambar 3.5. Diagram kotak roda gigi geser ditampilkan oleh Gambar 3.6. Posisi longitudinal mobil di sepanjang jalan dilambangkan dengan x_1 dan kecepatannya sebesar x_2 dengan dinamika lateral pada pembahasan ini diabaikan. Model memiliki dua sinyal kontrol: roda gigi dilambangkan oleh notasi *Roda Gigi* $\in \{1, 2, 3, 4\}$ dan posisi pencekik (*throttle*) dinotasikan sebagai $u \in [u_{\min}, u_{\max}]$. Keduanya dianggap sebagai masukan ke sistem, sedangkan posisi dan kecepatan adalah keluaran. Perpindahan gigi diperlukan karena sedikit tenaga yang dapat dihasilkan oleh mesin pada saat yang sangat rendah atau kecepatan mesin sangat tinggi. Fungsi α_i , $i = 1, 2, 3, 4$ mewakili efisiensi roda gigi - i .

Beberapa permasalahan kontrol yang menarik dapat diajukan untuk model mobil sederhana ini, termasuk berikut: Apa strategi kontrol optimal untuk mendorong dari $x=(a,0)$ ke $(b,0)$ dengan minimum waktu? Permasalahan ini tidak sepele jika asumsi yang masuk akal dimasukkan bahwa masing-masing perpindahan roda gigi membutuhkan waktu tertentu. Pengontrol optimal, yang dapat dimodelkan sebagai sistem hibrida, dapat diturunkan dengan menggunakan teori kontrol optimal dari sistem hibrida (Johansson, Lygeros, & Sastry, 2004).

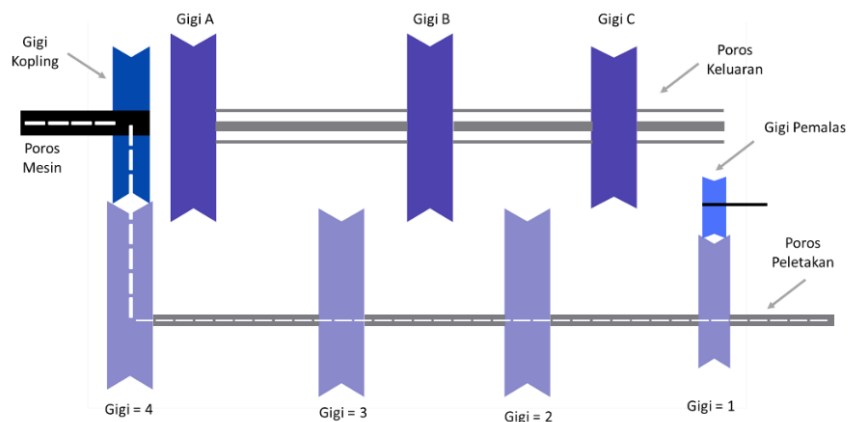


Gambar 3.4 Pemodelan sistem hibrida suatu mobil dengan empat roda gigi (Johansson, Lygeros, & Sastry, 2004)



Gambar 3.5 Tuas pemindah roda gigi

<https://circled.com.au/ft-drivetrain-control/4753-ft25-4-speed-gear-shift-knob.html>



Gambar 3.6 Diagram kotak roda gigi geser
<https://mechcontent.com/sliding-mesh-gearbox/>

3.4 Pengontrol Gerbang Kereta Api

Sistem hibrida selanjutnya adalah pengontrol gerbang kereta api ditampilkan pada Gambar 3.7 yang dibahas pada (Henzinger, Horowitz, Majumdar, & Wong-Toi, 2000). Sistem ini mempertimbangkan pengontrol gerbang kereta api tidak linier (Ho, 1995). Tiga otomaton hibrida digunakan untuk memodelkan kereta api, gerbang kereta api, dan pengontrol gerbang. Otomaton ini dapat disusun seperti pada (Alur, Courcoubetis, Henzinger, & Ho, 1993). Variabel bernilai riil x mewakili jarak kereta api dari gerbang. Pada awalnya, di lokasi yang jauh, kereta berjarak 1000 meter dari pintu gerbang, melaju dengan kecepatan 50 meter per detik menuju pintu gerbang dengan dinamika diberikan oleh persamaan (3.2a).

Pada jarak 500 meter, sebuah sensor di rel mendeteksi kereta, kemudian mengirimkan aplikasi sinyal ke pengontrol. Kereta api selanjutnya melambat, mengikuti persamaan diferensial (3.2b). Persamaan keseluruhan adalah

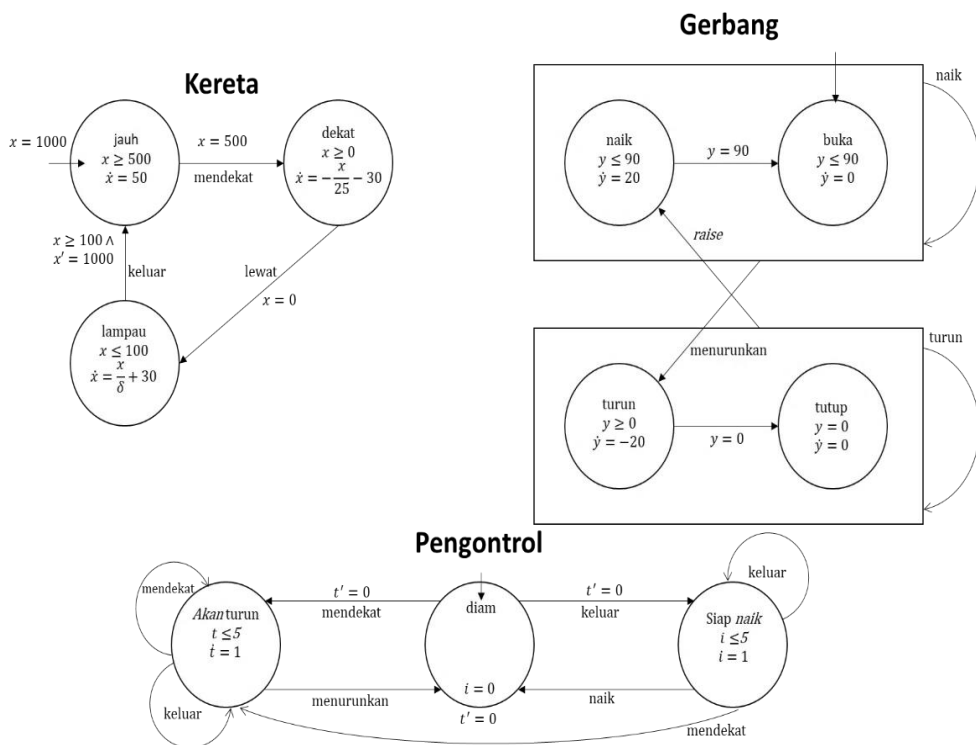
$$\dot{x}(t) = 50; x \geq 500 \quad (3.2a)$$

$$\dot{x}(t) = -\frac{x(t)}{25} - 30; 0 \leq x < 500 \quad (3.2b)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{x(t)}{5} + 30; 0 < x < 100 \quad (3.2c)$$

dengan $x(t) = 0$ adalah posisi di gerbang kereta api. Setelah jeda 5 detik, yang dimodelkan oleh variabel t , pengontrol mengirimkan sinyal lebih rendah ke gerbang, yang mulai turun dari 90 derajat ke 0 derajat dengan kecepatan -20 derajat per detik. Setelah melewati gerbang, kereta dipercepat sesuai dengan persamaan diferensial mengikuti persamaan (3.2c).

Sensor kedua yang ditempatkan 100 meter melewati perlintasan mendeteksi kereta yang berangkat, mengirimkan sinyal keluar ke pengontrol. Setelah 5 detik, pengontrol menaikkan gerbang. Setidaknya 1100 meter memisahkan kereta berurutan. Permasalahan yang muncul adalah bagaimana memverifikasi bahwa jika ada kereta dalam jarak 10 meter dari gerbang, maka gerbang ditutup. Sistem pada Gambar 3.7 memperlihatkan bahwa gerbang kereta api dan pengontrol gerbang juga merupakan sistem hibrida.



Gambar 3.7 Otomaton untuk kereta api, gerbang dan pengontrol
(Henzinger, Horowitz, Majumdar, & Wong-Toi, 2000)

4. ALGORITME LEBAH TANPA SENGAT

Di era transformasi digital yang semakin pesat, optimisasi menjadi salah satu aspek kunci dalam menyelesaikan berbagai permasalahan kompleks. Dalam dunia optimisasi dan pencarian solusi, terdapat banyak algoritme metaheuristik yang telah dikembangkan untuk mengatasi berbagai permasalahan yang kompleks dan sulit dipecahkan oleh pendekatan konvensional. Algoritme Koloni Lebah Buatan (KLB) (*Artificial Bee Colony (ABC)*) adalah salah satu algoritme metaheuristik yang telah menunjukkan sejumlah keunggulan dibandingkan dengan algoritme metaheuristik lainnya. Berikut adalah beberapa alasan mengapa KLB penting dan memiliki keunggulan dibandingkan dengan algoritme metaheuristik lain:

- Inspirasi dari alam
- Kemampuan eksplorasi dan eksploitasi yang seimbang
- Sederhana dan mudah diimplementasikan
- Efisien pada berbagai jenis permasalahan
- Performa yang kompetitif
- Potensi pengembangan dan penerapan

Oleh karenanya, algoritme KLB memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya penting dan menarik perhatian dalam konteks algoritme metaheuristik. Kombinasi antara inspirasi dari alam, kemampuan eksplorasi dan eksploitasi yang seimbang, serta kemudahan implementasi menjadikan KLB sebagai alat yang kuat dalam menyelesaikan permasalahan optimisasi yang kompleks dan beragam.

4.1 Kelompok Lebah dan Algoritme

Terdapat dua kelompok lebah yang menunjukkan tingkat sosialitas yang tinggi, yaitu lebah madu (*Apini*) dan lebah tanpa sengat (*Meliponini*). Sedikitnya ada 11 spesies lebah madu dalam satu *genus*, dan beberapa ratus spesies lebah tanpa sengat yang tersebar di lebih dari 36 *genera* (Michener, 2000). Di antara spesies tersebut, sedikitnya 22 spesies lebah tanpa sengat dan 3 spesies lebah madu dapat ditemukan di Sumatra Barat, Indonesia. Ketergantungan antara kebutuhan koloni dan perilaku individu dan sebaliknya, terutama oleh anggota masyarakat (pencari makan), adalah untuk menjaga kontak dengan lingkungan.

Keputusan individu mencari makan juga dipengaruhi oleh riwayat perilaku mereka. Hal ini mengarah pada perilaku mencari makan yang unik terkait dengan minat materi, kuantitas pengejaran, dan panjang usia (Fewell & Winston, 1992; O'Donnell & Jeanne, 1992; Biesmeijer & Tóth, 1998). Lebah tanpa sengat menunjukkan keragaman perilaku untuk merespons sumber makanan, seperti tanda bau, bantuan sosial, dan pengumpul utama (Lindauer, 1967; Michener, 1974; Schmidt, Zucchi, & Barth, 2003; Jarau dkk., 2004; Schmidt, Schorkopf, Hrncir, Zucchi, & Barth, 2006; Hrncir & Maia-Silva, 2012; Hrncir, Jarau, & Barth, 2016). Selain itu, sinyal getaran diamati sebagai bagian dari komunikasi untuk mencari makan yang berhubungan dengan sumber makanan (Hrncir dkk., 2006; Krausa, Hager, & Kirchner, 2017).

Perilaku mencari makan dari tiga spesies lebah tanpa sengat Sumatra yang dipelajari oleh Inoue, Salmah, Abbas, & Yusuf (1985) mengilhami pengembangan artikel pertama yang diterbitkan tentang algoritme lebah tanpa sengat (LTS) (*stingless bee algorithm (SBA)*) (Joelianto & Prakoso, 2017). Pemecahan masalah optimisasi kombinatorial berdasarkan perilaku dasar lebah tanpa sengat mengikuti Inoue, Salmah, Abbas, & Yusuf (1985), LTS mampu mempercepat proses konvergensi ke titik optimal dibandingkan algoritme lain yang terinspirasi oleh lebah (Joelianto & Prakoso, 2017). Algoritme LTS selanjutnya ditingkatkan ke masalah optimisasi numerik yang umum (Joelianto, Nainggolan, & Hidayat, 2020). Pada aplikasi waktu nyata yang memerlukan kecepatan optimisasi tinggi, di mana panjang iterasi bertambah ketika jumlah fungsi evaluasi bertambah, diperlukan solusi yang mendekati optimal yang lebih cepat. Solusi yang mendekati optimal yang lebih cepat ini diinginkan daripada solusi optimal yang sebenarnya tetapi lebih lama. Oleh karena itu, LTS yang dikembangkan adalah dimaksudkan untuk meningkatkan keefektifan algoritme dengan terobosan sistem yang memerlukan peningkatan konvergensi dan kinerja kecepatan untuk solusi yang mendekati optimal.

LTS yang diperoleh juga bertujuan untuk memperluas variasi algoritme berbasis kecerdasan kawanan (*swarm*) dari koloni lebah dan mengeksplorasi pengetahuan tentang perilaku lebah tanpa sengat dari alam. Tujuan lainnya adalah untuk menyelidiki perilaku mencari makan yang berbeda dari koloni lebah tanpa sengat ke dalam algoritme berbasis pencarian, dan untuk mengetahui kemampuan LTS dalam menyelesaikan masalah optimisasi numerik. Kemudian, LTS diuji untuk menyelesaikan berbagai jenis masalah

optimisasi numerik yang terdiri dari 50 fungsi tolok ukur (*benchmark*) terkenal dalam menemukan solusi yang mendekati optimal tanpa mengabaikan kualitas solusi.

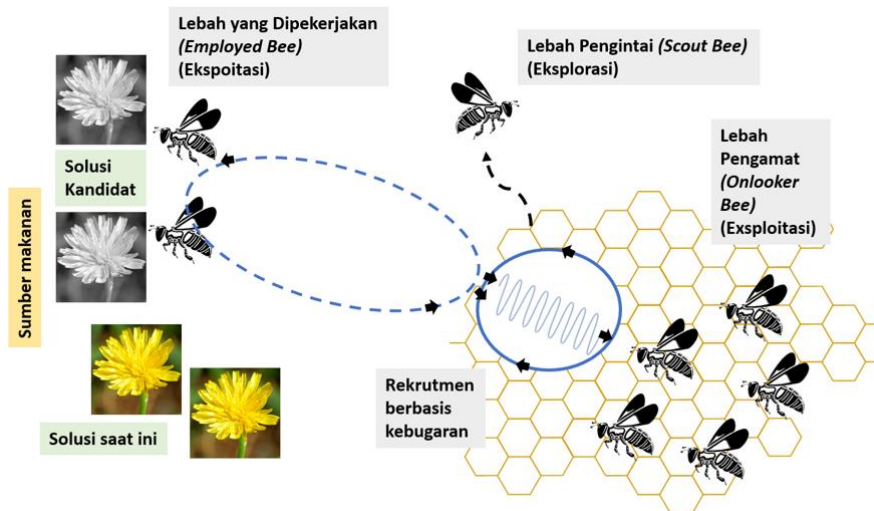
Kinerja algoritme LTS diukur dengan membandingkannya dengan KLB. Menarik untuk membandingkan LTS yang diusulkan dengan KLB dan semua variannya untuk mendapatkan perbandingan penuh. Namun, tujuan dari pengembangan algoritme LTS (Joelianto, Nainggolan, & Hidayat, 2020) dibatasi untuk menempatkan perhatian hanya pada investigasi perilaku lebah tanpa sengat alami berdasarkan (Inoue, Salmah, Abbas, & Yusuf, 1985) untuk algoritme pencarian. Gambar 4.1. menggambarkan perilaku lebah tanpa sengat. Oleh karena itu, perbandingan dengan algoritme KLB dilakukan tanpa ekstensi dan/atau peningkatan untuk evaluasi kinerja yang sebanding. Hal penting pada LTS adalah penerapan prinsip sistem hibrida yang diperlihatkan oleh beralihnya fungsi pekerjaan dari lebah dan pemindahan situs.

4.2 Algoritme Koloni Lebah Buatan

Versi awal dari KLB yang dikembangkan oleh (Karaboga, 2005) merupakan versi pertama untuk menyelesaikan masalah optimisasi numerik. Empat bagian utama hadir dalam algoritme KLB tersebut. Mereka adalah inisialisasi atau generator solusi acak, fase lebah pengamat, fase lebah pekerja, dan fase lebah pengintai. Langkah-langkah kunci dari algoritme ini adalah sebagai berikut:

- Inisialisasi (generator solusi acak)
- Ulang
 - Fase lebah pekerja (*Employed bee phase*)
 - Fase lebah pengamat (*Onlooker bee phase*)
 - Tahap lebah pengintai (*Scout bee phase*)
- Sampai persyaratan terpenuhi

Kesamaan mendasar dan beberapa perbedaan antara KLB dan LTS akan diuraikan di bagian ini. LTS menunjukkan langkah-langkah algoritme utama yang sama dengan KLB. Perbedaan utama antara kedua algoritme adalah ***operator variasi dalam fase eksploitasi*** yang pada gilirannya memberikan peningkatan pada algoritme KLB dengan memasukkan parameter kontrol baru yang terlibat. Perbandingan keseluruhan dapat dilihat pada diagram alir di referensi (Joelianto, Nainggolan, & Hidayat, 2020).



Gambar 4.1 Perilaku lebah tanpa sengat (Joelianto, Nainggolan, & Hidayat, 2020)

Pada diagram alir tersebut, sebelah kiri menunjukkan algoritme KLB standar sedangkan sebelah kanan adalah diagram alir LTS. Karena algoritme KLB telah ada selama bertahun-tahun, diagram alir LTS dibentuk dengan mengacu pada algoritme KLB. Langkah-langkah utama dari perilaku lebah tanpa sengat yang diadopsi dalam LTS dijelaskan sebagai prosedur yang dimodifikasi dan baru, dan prosedur ini tidak ada dalam algoritme KLB.

Prosedur yang dimodifikasi menggambarkan prosedur yang menunjukkan karakteristik yang mirip dengan prosedur KLB, tetapi dimodifikasi sesuai dengan karakteristik lebah tanpa sengat mengikuti referensi utama (Inoue, Salmah, Abbas, & Yusuf, 1985). Prosedur baru mewakili perilaku lebah tanpa sengat yang berbeda dengan lebah madu dan ditambahkan ke algoritme standar KLB.

4.3 Algoritme Lebah Tanpa Sengat

Berikut ini, langkah-langkah utama LTS dijelaskan sebagai berikut:

- Inisialisasi (generator solusi acak)
- Ulang
 - Fase lebah pekerja (*Employed bee phase*) - Eksploitasi
 - Fase lebah pengamat (*Onlooker bee phase*) - Eksploitasi
 - Tahap lebah pengintai (*Scout bee phase*) - Eksplorasi
- Sampai persyaratan terpenuhi

4.3.1 Inisialisasi

Baik di KLB maupun LTS, lokasi situs atau sumber makanan merepresentasikan kandidat solusi dari masalah pengoptimalan. Pertama, setiap masalah optimisasi diubah menjadi masalah minimisasi. Setiap kandidat solusi adalah vektor dengan dimensi D , x_{ij} dengan $j = 1, 2, \dots, D$, dengan i menunjukkan indeks dari setiap kandidat solusi $i = 1, 2, \dots, SN$ dengan SN adalah jumlah sumber makanan (Nomor Situs). Pada tahap inisialisasi, kandidat solusi didefinisikan seperti pada persamaan berikut.

$$x_i^j = x_{\min}^j + \text{rand}[0,1](x_{\max}^j - x_{\min}^j). \quad (4.1)$$

Kemudian kandidat solusi dievaluasi nilai kebugarannya (*fitness*) sebagai representasi dari jumlah dan kualitas nektar pada bunga yang dieksploitasi. Setiap kali seekor lebah mengevaluasi nilai kebugaran di suatu sumber makanan, lebah akan menyebarkan bau di lokasi tersebut. Selain sebagai penanda lokasi, bau juga memberikan informasi kualitas sumber makanan di lokasi tersebut.

4.3.2 Eksploitasi

Fase ini terdiri atas dua bagian: lebah pekerja dan lebah tidak bekerja. Lebah pekerja adalah lebah yang bekerja dengan tujuan mengeksploitasi situs tertentu. Jumlah lebah pekerja sama dengan jumlah situs. Pada fase ini, setiap situs akan dieksploitasi satu kali. Ketika seekor lebah mengunjungi suatu lokasi, lebah akan mengeksploitasi area tersebut dengan tujuan untuk meningkatkan kuantitas dan kualitas makanan.

Fase lebah pekerja dan lebah pengamat adalah operator variasi, dan mereka memodifikasi solusi sekarang seperti yang dijelaskan dalam (4.2)

$$v_{ij} = x_{ij} + \text{rand}[0,1](x_{ij} - x_{kj}) \quad (4.2)$$

dengan x_{kj} menunjukkan sumber makanan lain yang dipilih secara acak dari x_{ij} , dan $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ menunjukkan indeks yang dipilih secara acak. Jika kandidat solusi baru (v_{ij}) menunjukkan kualitas yang lebih baik, sumber makanan kemudian dialihkan ke solusi baru kandidat ($x_{ij} = v_{ij}$) (Karaboga & Akay, 2009; Kong, Chang, Dai, Wang, & Sun, 2018). Perbedaan antara lebah

pekerja dan lebah pengamat adalah lebah pekerja memodifikasi setiap sumber makanan satu kali dalam setiap siklus, sementara lebah pengamat ditugaskan untuk pergi agar sumber makanan dapat dieksploitasi berdasarkan kemungkinannya.

Ketika lebah buatan mengunjungi suatu lokasi, jika lebah tidak menemukan informasi bau yang cukup di sekitar lokasi untuk mendapatkan kandidat baru, hal itu direpresentasikan dengan persamaan (4.3) dan (4.4)

$$T_i = \text{rand}[-1,1]R \quad (4.3)$$

dengan T_i adalah vektor (arah eksploitasi) dan R adalah jarak Euclidean yang merupakan parameter kontrol mewakili rentang visual lebah

$$v_{ij} = x_{ij} + \text{rand}[0,1]T_{ij}. \quad (4.4)$$

Persamaan (4.4) menjelaskan mekanisme variasi yang digunakan. Jika lebah mendapatkan informasi bau, maka itu akan digunakan untuk mendapatkan vektor T_i (arah eksploitasi), seperti yang didefinisikan dalam persamaan (4.5) dan (4.6)

$$r_{iv} = \begin{cases} x'_{iv} - x_i; & \text{jika } f(x'_{iv}) > f(x_i) \text{ (penolak)} \\ -(x'_{iv} - x_i); & \text{jika } f(x'_{iv}) < f(x_i) \text{ (penarik)} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$T_i = -\sum_{v=1}^{N_v} \frac{R - ||r_{iv}||}{||r_{iv}||} \quad (4.6)$$

dengan T_i adalah arah vektor eksploitasi untuk kandidat solusi x_i . Jika searah vektor T , ada satu kumpulan penolak bau $r_{iv}(\text{sign}(T) = \text{sign}(r_{iv}))$. Kemudian, panjang vektor T akan dinormalisasi dengan panjang salah satu penolak bau dalam arah yang dipilih secara acak. Variabel R adalah jarak Euclidean yang merupakan parameter kontrol mewakili rentang visual lebah, x'_{iv} adalah vektor penolak/penarik relatif terhadap asal, r_{iv} adalah vektor penolak/penarik relatif terhadap posisi kandidat saat ini (x_i), dan N_v adalah jumlah bau terdekat di sekitar situs ke- i dalam kisaran R . Jumlah maksimum N_v adalah V yang merupakan parameter pengoptimalan yang mudah menguap. Nilai v_{ij} adalah solusi yang dimodifikasi dari x_{ij} , dan $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ adalah indeks untuk variabel dalam vektor x yang akan diubah.

Pada proses pertama, semua variabel dalam vektor x akan diubah hingga jumlah bau di ruang pencarian sama dengan $SN \times V$, kemudian j akan dipilih secara acak dengan persamaan yang dijelaskan dalam (4.7a). Di alam, bau yang dikeluarkan lebah akan hilang dalam waktu tertentu dan diadopsi ke dalam algoritme di mana bau lama akan diganti dengan bau baru ketika jumlah bau di ruang pencarian sudah melebihi batas maksimum $SN \times V$ yang diberikan. Persamaan probabilistik (4.7a) dan pemindahan situs (4.7b) diberikan oleh

$$p_j = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=1}^D T_{ik}} \quad (4.7a)$$

$$x_i = \begin{cases} v_i & ; \text{jika } f(v_i) \leq f(x_i) \\ x_i & ; \text{lainnya.} \end{cases} \quad (4.7b)$$

Setelah mendapatkan kandidat baru dan mengevaluasi nilai kebugarannya, lebah menyebarkan bau di lokasi baru sesuai dengan nilai kebugarannya. Pada tahap ini akan diterapkan mekanisme seleksi serakah (Karaboga & Akay, 2009; Wang dkk., 2020; Karaboga & Basturk, 2007). Situs akan dipindahkan ke lokasi baru (solusi) dengan nilai kebugaran yang sama atau lebih baik, diformulasikan oleh persamaan (4.7b). Tahap eksploitasi oleh lebah pekerja akan memakan waktu sebanyak SN , dan setiap situs akan dieksploitasi sekali ($i = 1, 2, \dots, SN$).

Setelah eksploitasi oleh lebah pekerja berlangsung di semua lokasi, lebah akan merekrut lebah tidak bekerja/pengamat yang berada di sarang dengan menyebarkan bau. Pada fase ini, lebah akan direkrut ke situs tertentu berdasarkan kualitas situs tersebut. Kemungkinan seekor lebah dalam memilih suatu lokasi sebanding dengan nilai kebugarannya. Banyak cara dan rumus yang dapat digunakan untuk menentukan probabilitas ini berdasarkan nilai kebugaran (Eiben & Smith, 2015). Persamaan (4.8) dan (4.9) akan digunakan untuk menentukan probabilitas nilai kebugaran.

$$fit_i = \frac{1}{\sqrt{r(x_i)}} \quad (4.8)$$

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (4.9)$$

dengan p_i adalah kemungkinan bahwa situs ke- i akan dieksploitasi oleh lebah tidak bekerja, dan $r(x_i)$ adalah peringkat dari situs ke- i yang diurutkan berdasarkan evaluasi fungsi tujuannya (Karaboga & Akay, 2009; Karaboga & Basturk, 2007). Persamaan tersebut menjelaskan bahwa semakin rendah kualitas suatu situs dibandingkan dengan yang lain, maka kemungkinan untuk dieksploitasi akan semakin kecil. Fase lebah tidak bekerja (*unemployed bee phase*) bertujuan agar kandidat solusi yang potensial dapat dieksploitasi lebih sering daripada kandidat yang kurang potensial untuk mengurangi jumlah evaluasi fungsi.

Fase lebah tidak bekerja berlangsung sampai semua lebah dalam koloni mengeksplorasi sebuah situs. Setelah siklus berakhir, hal itu akan berulang dari fase lebah yang dipekerjakan. Jadi, jumlah lebah yang menganggur (OL) sama dengan jumlah koloni (CS) dikurangi dengan jumlah lebah yang dipekerjakan (SN) atau dengan kata lain $OL = CS - SN$. Suatu tempat akan terus dieksploitasi oleh lebah hingga sumber makanan yang tersedia habis. Dalam hal ini, situs akan ditinggalkan jika dikunjungi sebanyak L , dan nilai kebugarannya tidak dapat ditingkatkan lagi. Adanya situs yang terbengkalai akan memaksa lebah pengintai (*scout bee*) menggali potensi sumber baru.

4.3.3 Eksplorasi

Tahap eksplorasi pada dasarnya mirip dengan tahap inisialisasi di mana calon solusi dibangkitkan secara acak dengan persamaan (4.1). Dalam algoritme ini, beberapa modifikasi akan ditambahkan untuk mengadopsi perilaku mencari makan lebah tanpa sengat. Lebah pengintai dapat memilih untuk menjelajahi sumber makanan lain atau mengunjungi situs yang sebelumnya ditinggalkan untuk diselidiki. Probabilitas lebah pengintai untuk memilih situs lama ditentukan oleh parameter rA . Parameter ini mengontrol keseimbangan antara eksploitasi dan eksplorasi.

Jika seekor lebah memilih untuk mengunjungi situs yang ditinggalkan, situs tersebut disebut situs reaktivasi. Untuk menyelidiki situs ini, lebah akan mencoba mengeksplorasi seperti biasa tetapi ruang pencarian R diperkecil. Eksploitasi didefinisikan dalam persamaan (4.10) dan (4.11)

$$T_i = - \sum_{v=1}^{N_v} r_{iv} \frac{\alpha_i R - ||r_{iv}||}{||r_{iv}||} \quad (4.10)$$

$$\alpha_i = \frac{\sum_{v=1}^{N_v} ||r_{iv}||}{RN_v} . \quad (4.11)$$

Nilai T_i menjelaskan investigasi menggunakan R yang diperkecil oleh pengganda α yang diperoleh dari bau di sekitarnya tepat sebelum lokasi ditinggalkan. Dengan kata lain, persamaan (4.10) dan (4.11) menyebutkan bahwa R untuk lokasi reaktivasi adalah jarak rata-rata lokasi terhadap bau penolak di sekitarnya.

4.4 Perbandingan Keberhasilan LTS terhadap KLB

Tingkat keberhasilan (*Success Rate (SR)*) pada (4.12) didefinisikan sebagai persentase tingkat keberhasilan (*NSR*) algoritme untuk mendapatkan solusi dari masalah optimisasi keseluruhan (R)

$$SR = \frac{NSR}{R} . \quad (4.12)$$

Sebuah proses optimisasi dikatakan berhasil jika dapat menemukan solusi yang menciptakan nilai kebugaran di bawah atau sama dengan yang dapat diterima tingkat kebugaran minimum (*Minimum Fitness Level (MFL)*) pada (4.13) (Eiben & Smith, 2015). Pada suatu optimisasi, sering kali dibutuhkan waktu yang cepat untuk mendapatkan solusi optimal lebih daripada solusi yang paling optimal. Sebagai kompromi, solusi yang berada dekat titik optimal yang diperoleh dengan cepat lebih dikehendaki daripada solusi optimal namun lebih sulit diperoleh. Solusi ini disebut dengan solusi dekat-optimal. Hal ini sering dijumpai pada aplikasi waktu nyata. Pada kasus-kasus seperti ini, toleransi untuk MFL akan lebih tinggi.

MFL dalam percobaan ini diklasifikasikan sebagai 5% dari rata-rata nilai kebugaran terbaik pada fase inisialisasi dikurangi nilai kebugaran minimum dari setiap fungsi tolok ukur

$$MFL = \frac{\overline{fit_{rand}}}{100} \% , \quad (4.13)$$

dengan $\overline{fit}_{rand}$ adalah nilai rata-rata dari sejumlah solusi yang dibangkitkan secara acak. Tolok ukur kesalahan akhir (*final error (FE)*) dan nilai minimum yang ditemukan pada terminasi diformulasikan pada (4.14)

$$FE = fit_T - fit_{\min}. \quad (4.14)$$

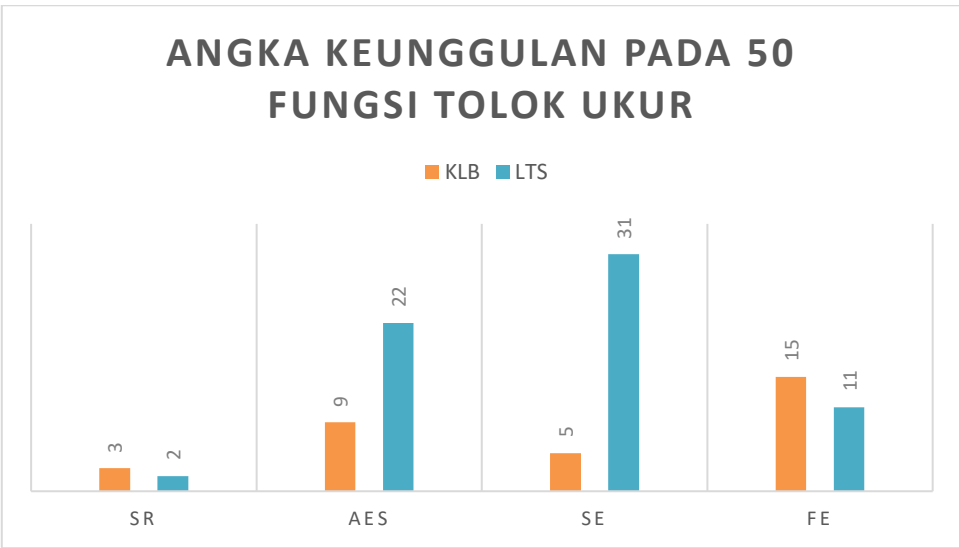
Evaluasi fungsi rata-rata untuk solusi (*Average Number of Evaluation to a Solution (AES)*) pada (4.15) mewakili rata-rata fungsi evaluasi yang diperlukan oleh algoritme untuk menemukan MFL (Eiben & Smith, 2015)

$$AES = \frac{fe_{MFL}}{n} \quad (4.15)$$

dengan fe_{MFL} adalah jumlah evaluasi fungsi optimisasi yang dibutuhkan hingga diperoleh solusi MFL. Nilai n adalah jumlah pengulangan pada fungsi yang sama. Jumlah kesalahan (*Sum of Error (SE)*) pada (4.16) adalah area di bawah kurva konvergensi optimisasi dengan nilai K adalah maksimum iterasi pada suatu optimisasi, dirumuskan sebagai

$$SE = \sum_{i=1}^K (fit_i - fit_{\min}). \quad (4.16)$$

Gambar 4.2 menunjukkan jumlah angka kinerja unggul dari KLB dan LTS pada 50 fungsi tolok ukur dengan tipe-tipe fungsi standar pengetesan algoritme optimisasi (Joelianto, Nainggolan, & Hidayat, 2020). Dalam kriteria kinerja SR dan FE, KLB menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada LTS dengan perbedaan kecil. Namun, dalam kriteria kinerja AES dan SE, algoritme LTS menghasilkan angka kinerja yang sangat tinggi dibandingkan dengan KLB. Kesimpulannya adalah secara umum kinerja LTS, menurut empat kriteria kinerja, serupa atau lebih baik dari KLB.



Gambar 4.2 Perbandingan angka kinerja KLB (ABC) dan LTS (SBA)

5. KONTROL REFERENSI HIBRIDA

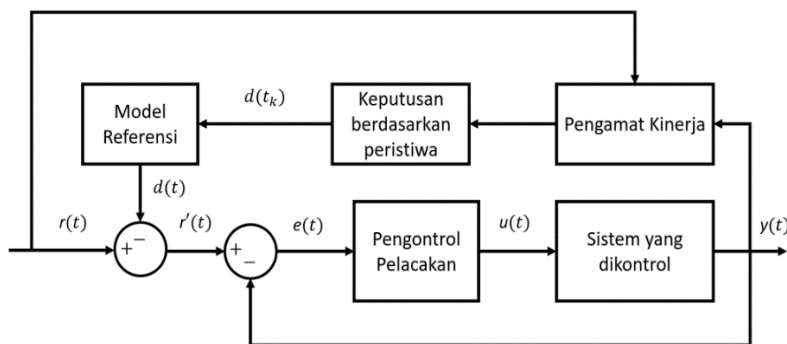
Tujuan umum dari desain sistem kontrol adalah untuk membangun mekanisme yang menjaga keluaran sistem yang dikontrol mengikuti atau melacak lintasan yang diinginkan dengan adanya gangguan yang bekerja pada sistem yang dikontrol. Dalam masalah pelacakan referensi, pengontrol harus dirancang sedemikian rupa sehingga keluaran sistem yang dikontrol dari sistem kontrol umpan balik lup tertutup melacak lintasan referensi dengan kesalahan pelacakan terbatas untuk sepanjang waktu. Selain itu, biasanya diperlukan kesalahan pelacakan mendekati nol secara asimtotik dalam batas seiring berjalannya waktu hingga tak terhingga tanpa tergantung dari setiap keadaan awal sistem yang dikontrol.

Berbagai desain sistem kontrol telah ada dalam literatur, misalnya peletakan pole (*pole placement*) (Wolovich, 1974; Fallside, 1977; Kailath, 1980), kuadrat linier (KL) (*linear quadratic (LQ)*) (Kwakernaak & Sivan, 1972; Anderson & Moore, 2007), kontrol robas linier (*linear robust control*) (Dorato, Cerone, & Abdallah, 1994; Green & Limebeer, 1994) dan pengontrol proporsional-integral-derivatif (PID). Semua pengontrol yang dihasilkan dikategorikan sebagai pengontrol satu derajat kebebasan dengan konfigurasi kontrol tidak menggunakan desain prafilter.

Masalah utama yang dihadapi oleh semua metode desain adalah bahwa kendala desain seringkali tidak sesuai. Misalnya, pengontrol konvensional dapat dipilih untuk menghasilkan respons keluaran cepat dan tidak peka terhadap ketidakpastian sistem. Namun, sistem kontrol lup tertutup memiliki kecenderungan untuk memiliki lonjakan (*overshoot*) yang buruk saat pengoperasian awal (*start-up*), perubahan nilai yang diinginkan (*set-point*), atau pemulihan dari gangguan. Telah ditunjukkan dalam (Rosenbrock, 1969) bahwa karakteristik sistem lup tertutup secara bersamaan ditetapkan oleh zero transmisi (*transmission zero*) dari sistem yang dikontrol. Keterbatasan kinerja secara sifat yang permanen terkait dengan sifat konstitutif dan struktural dari sistem dinamik sistem yang dikontrol yang menentukan pencapaian desain sistem umpan balik (Seron, Braslavsky, & Goodwin, 2012).

5.1 Kontrol Referensi Hibrida (*Hybrid Reference Control*)

Sistem kontrol referensi hibrida (KRH) adalah sistem kontrol yang meningkatkan kinerja pelacakan sinyal referensi dari sistem pelacakan linier waktu kontinu lup tertutup dengan memanipulasi sinyal referensi. Sistem kontrol terdiri dari pengontrol pelacakan konvensional dan aturan keputusan untuk mengubah sinyal referensi. Pengontrol konvensional memiliki variabel keadaan kontinu sebagai masukan, sedangkan aturan keputusan menerima dan menghitung variabel bernilai diskrit. Komunikasi antara variabel bernilai kontinu dan diskrit difasilitasi melalui antarmuka yang terdiri dari generator sinyal referensi dan pengamat kinerja. Strategi manajemen nilai referensi baru ini diusulkan pada literatur (Joelianto & Williamson, 1997a; Joelianto & Williamson, 1997b; Joelianto & Williamson, 1998a; Joelianto & Williamson, 1998b; Joelianto & Williamson, 2009; Joelianto, 2014). Struktur sistem KRH dengan sistem yang dikontrol linier ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Diagram blok dari kontrol referensi hibrida

Sistem kontrol pelacakan lup tertutup konvensional terdiri dari sistem yang dikontrol dan pengontrol pelacakan yang diwakili oleh sistem kontinu. Selain itu, konfigurasi menyajikan aturan keputusan berbasis kejadian yang memperoleh kejadian yang memungkinkan untuk memulai perubahan pada sinyal referensi r yang dihasilkan oleh pengamat kinerja. Melalui Prinsip Model Internal (PMI) (*Internal Model Principle (IMP)*) (Francis & Wonham, 1975; Francis & Wonham, 1976), perubahan sinyal referensi dapat dicapai dengan menambahkan vektor keputusan terpilih yang menghasilkan perubahan impulsif pada variabel keadaan model sinyal referensi pada waktu kejadian. Dinamika masukan/keluaran dari aturan keputusan berbentuk sistem kejadian diskrit (Zeigler, 1989; Zeigler, Song, Kim, & Praehofer, 1995).

5.2 Kontrol Referensi Hibrida sebagai Sistem Impulsif Linier

Tinjau sistem invarian waktu linier waktu kontinu berorde minimal dengan variabel keadaan $x(t) \in R^n$, keluaran $y(t) \in R^l$, dan masukan $u(t) \in R^m$ seperti yang direpresentasikan dengan persamaan berikut

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t).\end{aligned}\tag{5.1}$$

Keluaran dari sistem invarian waktu linier waktu kontinu minimal $y(t)$ yang dijelaskan oleh (5.1) diperlukan untuk melacak suatu lintasan referensi $r_d(t)$ ditentukan oleh

$$r_d(t) = \Lambda e^{A_r t} v; \quad t \geq 0\tag{5.2}$$

untuk beberapa $\{\Lambda, A_r, v\}$.

Jaminan pelacakan yang sempurna diberikan oleh Prinsip Model Internal (Francis & Wonham, 1976) yang mungkin melibatkan desain pra-kompensator. Namun untuk kesederhanaan, asumsikan di sini, bahwa semua nilai eigen dari A_r dalam sinyal referensi adalah nilai eigen matriks A dari sistem yang dikontrol. Sinyal referensi r_d dalam (5.2) kemudian dapat dimodelkan sebagai respons dari sistem invarian waktu linier

$$\begin{aligned}\dot{x}_r(t) &= Ax_r(t); \quad x_r(0) \in R^n \\ r(t) &= Cx_r(t).\end{aligned}\tag{5.3}$$

Keunikan sinyal referensi yang dihasilkan pada persamaan (5.3) sehubungan dengan kondisi awal $x_r(0)$ telah ditunjukkan dalam teorema di referensi (Joelianto & Williamson, 2009).

Sekarang tinjau kesalahan pelacakan keadaan z dan kesalahan pelacakan keluaran y_d terhadap sinyal referensi r_d yang didefinisikan sebagai berikut.

$$z(t) \triangleq x(t) - x_r(t); \quad y_d(t) \triangleq y(t) - r_d(t).$$

Dengan menggunakan persamaan (5.1) dan (5.3) didapatkan

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t); \quad z(t) \in R^n$$

$$y_d(t) = Cz(t).$$

Misalkan keadaan sistem yang dikontrol lengkap (*full plant state*) x tersedia untuk pengukuran. Kemudian kompensator pelacakan umpan balik dengan metode peletakan pole-zero (Fallside, 1977) atau kuadratik linier (KL) (Kwakernaak & Sivan, 1972; Dorato, Cerone, & Abdallah, 1994; Green & Limebeer, 1994; Zhou & Doyle, 1998; Anderson & Moore, 2007) dapat dirancang untuk menghasilkan suatu hukum kontrol umpan balik menstabilkan

$$u(t) = -K(x(t) - x_r(t)) = -Kz(t) . \quad (5.4)$$

Sistem kesalahan lup tertutup diberikan oleh

$$\dot{z}(t) = [A - BK]z(t) \triangleq Fz(t) \quad (5.5)$$

dengan K dipilih sedemikian rupa sehingga matriks F memiliki nilai eigen dengan semua bagian riil adalah negatif (stabil) yaitu $\text{Re } \lambda_i(F) < 0$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Prinsip model internal menjamin keluaran sistem yang dikontrol y (5.1) dengan u (5.4) melacak setiap referensi r (5.3) terlepas dari keadaan awal $x_r(0)$ dari model referensi, dan terlepas dari setiap perubahan dalam keadaan model referensi yang mungkin terjadi di beberapa waktu kemudian $t_k > 0$. Untuk membedakan r pada (5.3) dari r_d yang sesuai dengan $x_r(0) = x_{rd}$ seperti yang didefinisikan dalam Teorema di (Joelianto & Williamson, 2009), selanjutnya akan didefinisikan r_d sebagai referensi asal (*default reference*).

Pendekatan standar dalam pelacakan referensi adalah mengatur $x_r(0) = x_{rd}$ dalam model referensi (5.3), dan tidak ada penyesuaian lebih lanjut ke keadaan model referensi. Stabilitas dari F kemudian menjamin bahwa kesalahan pelacakan keluaran y_d konvergen ke nol. Oleh karena itu, kinerja sementara ditentukan oleh besarnya kesalahan $||x(0) - x_{rd}||$ dan nilai eigen dari F . Kesalahan awal yang besar dapat muncul baik dari kondisi awal sistem yang dikontrol yang buruk ($x(0)$ pada waktu $t = 0$) dan/atau pra-kompensator atau dari gangguan seperti impuls yang bekerja pada sistem yang dikontrol (5.1). Misal pada waktu instan t_k , variabel keadaan $x_r(t_k)$ dari sinyal referensi secara mendadak diubah ke $x_r(t_k^+)$ dengan

$$x_r(t_k^+) = x_r(t_k) - d(t_k) \quad (5.6)$$

dan dengan keadaan referensi $x_r(t)$ adalah

$$x_r(t) = e^{A(t-t_{k-1})} x_r(t_{k-1}^+); t_{k-1} < t \leq t_k.$$

Vektor $d(t_k)$ disebut sebagai vektor keputusan. Perubahan keadaan referensi x_r pada waktu instan t_k yang diberikan oleh

$$x_r(t_k) = e^{A(t_k-t_{k-1})} x_r(t_{k-1}^+)$$

menghasilkan perubahan sinyal referensi dari r_{k-1} ke r_k sebagai berikut

$$\begin{aligned} r_{k-1}(t) &= Ce^{A(t-t_{k-1})} x_r(t_{k-1}^+); t_{k-1} < t \leq t_k \\ r_k(t) &= Ce^{A(t-t_k)} x_r(t_k^+); t_k < t \leq t_{k+1}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Sebagai akibatnya $r_k(t) \neq r_{k-1}(t)$ untuk $t = t_k^+$ jika $x_r(t_k^+) \neq x_r(t_k)$. Representasi sistem secara keseluruhan dituliskan sebagai

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); & y(t) &= Cx(t) \\ \dot{x}_r(t) &= Ax_r(t); & r(t) &= Cx_r(t) \\ x_r(t_k^+) &= x_r(t_k) - d(t_k) \\ u(t) &= -Kz(t); & z(t) &\triangleq x(t) - x_r(t) \end{aligned} \quad (5.8)$$

yang melibatkan variabel kontrol $u(t)$ dan vektor keputusan $d(t_k) \in D$ untuk mengubah sinyal referensi. Model (5.8) dikenal sebagai sistem impulsif linier (Bainov & Simeonov, 1989; Lakshminkantham & Simeonov, 1989). Sistem ini menggambarkan suatu sistem kontrol baru dengan mengubah sinyal referensi secara waktu diskrit dan sinyal kontrol secara waktu kontinu yang disebut sebagai Kontrol Referensi Hibrida (KRH) (*Hybrid Reference Control (HRC)*) (Joelianto & Williamson, 1997a; Joelianto & Williamson, 1997b; Joelianto & Williamson, 1998a; Joelianto & Williamson, 1998b; Joelianto & Williamson, 2009; Joelianto, 2014) yang merupakan kasus khusus dari sistem hibrida umum (Ye, Michel, & Antsaklis, 1995; Branicky, Borkar, & Mitter, 1998; Lakshminkantham & Devi, 2006). Permasalahan sistem kontrol baru KRH adalah menentukan vektor keputusan yang dapat diterima D (*admissible decision vector*) dengan masih memerlukan sinyal referensi asal r_d yang

berhubungan dengan $x_r(t_k^+) = e^{At_k} x_{rd}$ (sebelum dikontrol) terkait dengan nilai keluaran yang diinginkan.

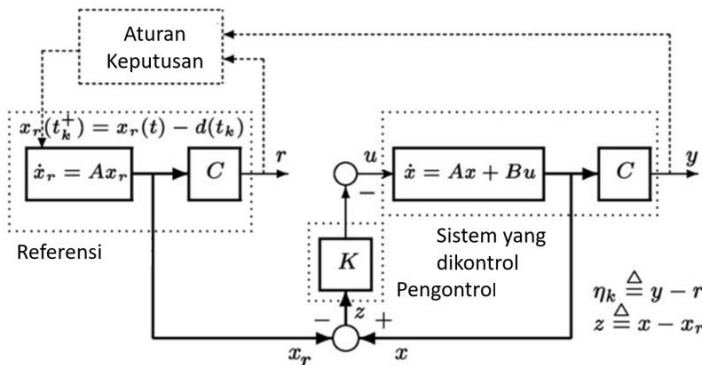
Asumsikan bahwa variabel keadaan sistem yang dikontrol lengkap x di (5.8) tersedia untuk pengukuran, dan misalkan $\eta_k \triangleq y - r_k$ dan mendefinisikan kesalahan pelacakan keluaran. Karena keadaan lup tertutup menyatakan x dalam (5.1) pada waktu $t = t_k$ adalah kontinu, dinamika z dan η_k untuk sistem lup tertutup dari sistem KRH (5.8) diformulasikan oleh sistem impulsif linier

$$\dot{z}(t) = Fz(t); z(0^+) = z_0; t_k < t \leq t_{k+1}$$

$$\eta_k(t) = Cz(t) \quad (5.9)$$

$$z(t_k^+) = z(t_k) + d(t_k).$$

Meskipun sistem kesalahan (5.9) adalah linier dan invarian waktu untuk interval $t_k < t \leq t_{k+1}$, solusi z untuk $t \geq 0^+$ juga bergantung pada waktu kejadian $\{t_k\}$, dan vektor keputusan $\{d(t_k)\}$. Perhatikan bahwa kondisi awal $z(0^+) = z_0$ digunakan daripada $z(0) = z_0$. Jika waktu $t = 0$ tidak sesuai dengan suatu kejadian, maka $z(0^+) = z_0$ adalah kondisi awal. Di sisi lain, jika $t = 0$ berhubungan dengan kejadian diskrit, maka $z(0^+) = z_0 + d(0)$ dianggap sebagai kondisi awal. Sifat-sifat matematis dan kestabilan Lyapunov dari SIL (5.9) sehubungan dengan pilihan vektor keputusan $\{d(t_k)\}$ telah dikembangkan di referensi (Joelianto & Williamson, 1997; Joelianto & Williamson, 1998). Representasi ruang keadaan dari KRH ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Representasi ruang keadaan kontrol referensi hibrida

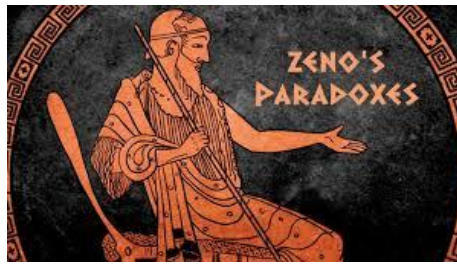
5.3 Waktu Instan dan Kejadian

KRH dapat dimulai dengan kejadian pengaktif (*enable event*) yang didefinisikan terjadi pada waktu t_k , jika

$$|y_{i,d}(t_k)| \geq \delta_i; \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, l \quad (5.10)$$

dengan $y_{i,d}$ adalah komponen ke- i dari kesalahan keluaran y_d untuk beberapa konstanta tertentu δ_i . Misalkan melalui suatu sensor ambang batas, kondisi (5.10) digunakan untuk menghasilkan kejadian yang diaktifkan melalui waktu kontinu atau waktu pengamatan tercacah. Nilai δ_i akan menentukan seberapa sering kejadian pengaktifan akan terjadi. Penggunaan δ_i kecil mampu mendeteksi penyimpangan kecil dari besarnya keluaran sistem yang dikontrol $y_{i,d}$. Namun, nilai δ_i yang kecil mungkin bukan desain yang bagus karena menyebabkan peralihan cepat yang tidak diinginkan dari desain sistem kontrol, yang dikenal sebagai fenomena Zeno (Johansson, Egerstedt, Lygeros, & Sastry, 1999; Heymann, Lin, Meyer, & Resmerita, 2005). Di sisi lain, penggunaan δ_i besar juga bukan pilihan yang baik karena tidak peka terhadap deviasi kecil pada keluaran sistem yang dikontrol.

Fenomena Zeno mengacu pada filsuf Zeno dari Elea (500-400 SM) (Britannica, 2020) yang terkenal dengan sejumlah paradoks yang diilustrasikan pada Gambar 5.3. Zeno memiliki banyak hasil karya pemikiran berupa argumen yang menggugah pemahaman pada masa itu. Utamanya adalah tentang konsep ketakterhinggaan yang merupakan dukungan Zeno terhadap ajaran Parmenides dan adanya kecenderungan menentang kaum Pythagorean berdasarkan kisah dari Plato. *Zenoness* (Heymann, Lin, Meyer, & Resmerita, 2005) menggambarkan fenomena unik dalam sistem hibrida yang menggambarkan situasi di mana terjadi transisi diskrit dalam jumlah yang tidak terbatas dalam jangka waktu yang terhingga dan terbatas. Hal ini dapat terjadi, misalnya, ketika pengontrol (diskrit) gagal memenuhi spesifikasi invarian dengan mengalihkan sistem lebih cepat dan lebih cepat di antara konfigurasi yang berbeda.



“jika ada banyak, pasti ada yang serupa dan tidak serupa, dan ini tidak mungkin, karena yang serupa tidak dapat menjadi tidak serupa, dan yang tidak serupa tidak dapat menjadi serupa” (Zeno)

“if being is many, it must be both like and unlike, and this is impossible, for neither can the like be unlike, nor the unlike like” (Zeno)

Gambar 5.3 Ilustrasi Zeno's paradoxes: *The Mind Voyager*

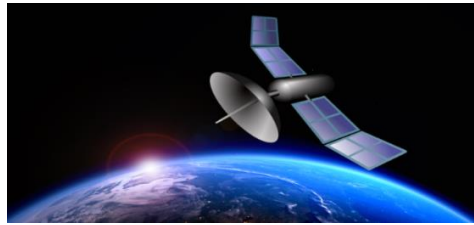
Setelah waktu instan yang diaktifkan dimulai, kejadian tersebut kemudian diikuti oleh serangkaian kejadian terjadi pada selang waktu yang telah ditentukan. Deskripsi yang tepat tentang kejadian pengaktifan bukanlah permasalahannya karena dapat didorong oleh kejadian (*event driven*) atau didorong oleh waktu (*time driven*) (Joelianto & Williamson, 1997). Namun yang menjadi fokus adalah pada strategi untuk mengurangi kesalahan pelacakan setelah kejadian pengaktifan terdeteksi. Strategi yang dilakukan adalah mengubah sinyal referensi pada saat kejadian $\{t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+p+1}\}$ dengan p berhingga dengan secara instan mengubah keadaan saat ini $\{x(t_k), x(t_{k+1}), \dots, x(t_{k+p+1})\}$ tanpa adanya kenaikan sinyal kontrol $u(t)$ yang tinggi, dengan waktu instan t_k selalu didefinisikan sebagai kejadian yang diaktifkan sebagai hasil dari (5.10).

Kondisi yang menghasilkan solusi analitis dari metode KRH adalah menggunakan interval waktu yang **dibuat tetap**, yang dapat diinterpretasikan sebagai waktu pengambilan sampel dalam sistem kontrol digital. Alasan lengkap dan detil dapat dilihat pada referensi (Joelianto & Williamson, 1997; Joelianto & Williamson, 2009). Jika interval waktu didorong oleh kejadian, kondisi ini menyebabkan metode KRH perlu menggabungkan optimisasi daring dan kemungkinan memunculkan fenomena Zeno.

Sifat-sifat kestabilan asimtotik (5.9) menjamin bahwa limit kesalahan pelacakan $\eta(t)$ mendekati nol dan akan melacak kembali sinyal referensi asal r_d ketika pada kejadian terakhir diterapkan vektor keputusan yang mengembalikan r_k ke r_d . Kondisi keterkontrolan dan keteramatan sistem yang dikontrol akan menjamin kestabilan asimtotik dan konvergensi dari sinyal referensi r_k ke referensi asal r_d (Joelianto & Williamson, 2009).

5.4 Kontrol Referensi Hibrida untuk Perbaikan Respons Transien

Perhatikan model sistem linier berorde empat dari suatu satelit yang terdiri dari dua massa dihubungkan oleh pegas dengan konstanta torsi (*torque*) κ dan konstanta redaman kental (*viscous damping*) ξ dengan ilustrasi diperlihatkan oleh Gambar 5.4. Contoh ini dapat dilihat dengan detail pada referensi (Joelianto & Williamson, 2009). Persamaan gerak, sebagai contoh, diambil dari (Franklin, Powell, & Emami-Naeini, 1986) diberikan persamaan (5.11)



Gambar 5.4 Ilustrasi satelit di ruang angkasa (Hasil dari kreasi dua gambar di Pixabay)

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_2(t) \\ \ddot{\theta}_2(t) \\ \dot{\theta}_1(t) \\ \ddot{\theta}_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0,91 & -0,036 & 0,91 & 0,036 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0,091 & -0,0036 & -0,091 & -0,0036 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(t) \\ \dot{\theta}_2(t) \\ \theta_1(t) \\ \dot{\theta}_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (5.11)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(t) \\ \dot{\theta}_2(t) \\ \theta_1(t) \\ \dot{\theta}_1(t) \end{bmatrix}.$$

Variabel θ_i , $i=1,2$, adalah posisi sudut masa pertama dan kedua, dan $\dot{\theta}$ adalah turunannya. Penerapan metode konvensional peletakan pole

digunakan untuk mendapatkan respons yang diinginkan. Penguatan umpan balik yang dihasilkan diberikan pada (5.12),

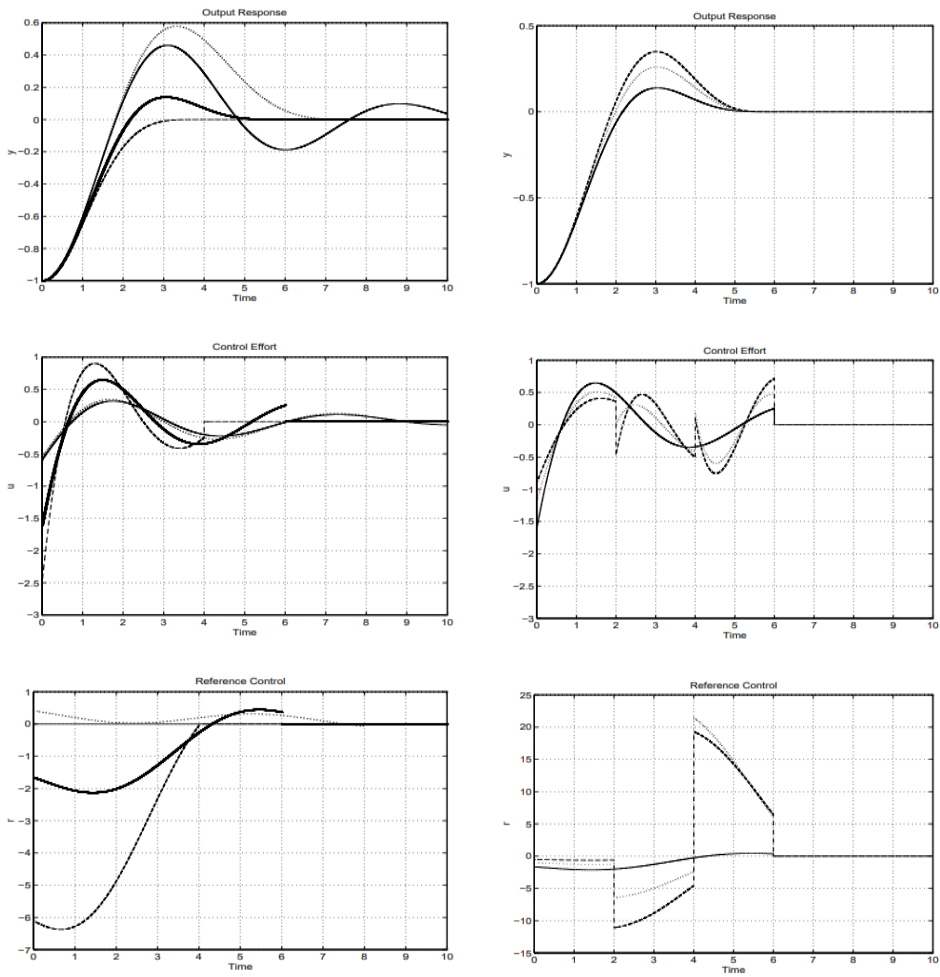
$$K = [-0,595 \quad 0,275 \quad 1,32 \quad 1,66] \quad (5.12)$$

dengan nilai eigen lup tertutup adalah $\lambda_{1,2} = -0,25 \pm j1,1$ dan $\lambda_{3,4} = -0,6 \pm j0,4$ yang menghasilkan respons lup tertutup berosilasi teredam. Penerapan KRH dengan waktu instan tunggal dan beberapa mampu memperbaiki respons transien diperlihatkan oleh Gambar 5.5.

Desain (a): Untuk kasus pertama, situasi adalah dipertimbangkan jika hanya terjadi satu kejadian pengaktifan. Sistem KRH diimplementasikan dengan menggunakan dua vektor keputusan $d(t_0)$ aktif pada waktu t_0 dan $d(t_1)$ pada kejadian terjadwal $t_1 = t_0 + \tau_0$ dengan $\delta_i = 0,1$ dalam persamaan (5.10). Selanjutnya diasumsikan tidak ada gangguan impulsif terjadi pada selang waktu $t_0 < t \leq t_0 + \tau_0^+$. Strategi untuk menghasilkan respons yang *deadbeat* mengikuti Teorema di (Joelianto & Williamson, 2009). Dalam hal ini, satu-satunya variabel yang dipilih adalah rentang waktu interval $\tau_0 > 0$. Simulasi hasil ditunjukkan pada Gambar 5.5a untuk tiga nilai berbeda $\tau_0 = 4$ detik, 6 detik dan 8 detik. Hasil juga dibandingkan dengan respons umpan balik menggunakan metode penguatan konvensional peletakan pole.

Desain (b): Gambar 5.5b menggambarkan sistem KRH menghasilkan respons *deadbeat* dengan menggunakan 4 vektor keputusan. Empat vektor keputusan berturut-turut mengikuti strategi seperti yang diberikan pada *Corollary* di (Joelianto & Williamson, 2009), di mana terdapat 3 variabel α dipilih selain jendela waktu τ . Di dalam simulasi, jendela waktu dipilih menjadi $\tau_0 = 6$ detik dan 3 kombinasi α_k diterapkan pada jendela waktu tetap yang seragam $\tau = (1 / \tau_0) = 2$ detik dan dengan $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$. Perbandingan dengan KRH memakai dua variabel keputusan memperlihatkan bahwa penggunaan α_k meningkatkan respons lonjakan, tetapi mengurangi besarnya sinyal kontrol maksimum. Misalkan upaya kontrol diukur dengan energi kontrol $I_{\{\alpha_0; \alpha_1; \alpha_2\}} = \int_0^6 u^2(t) d(t)$, energi kontrol dengan 4 vektor

keputusan $I_{\{0,3;0,6;0,1\}} = 0,94$ dan $I_{\{0,6;0,3;0,1\}} = 1,05$ adalah lebih kecil dibandingkan dengan 2 vektor keputusan $I_{\{1;0;0\}} = 1,08$.



Desain (a) *Desain (b)*
Gambar 5.5 Kontrol referensi hibrida (a) dua vektor, (b) empat vektor

6. KONTROL REFERENSI HIBRIDA DENGAN LOGIKA FUZZY

Pengontrol PID (Proporsional-Integral-Derivatif) merupakan salah satu pengontrol yang dikenal luas dan telah terbukti di industri selama lebih dari delapan dekade. Pengontrol PID ditemukan pada tahun 1922 dan sampai sekarang masih merupakan pengontrol yang paling banyak digunakan, lebih dari 80% loop kontrol umpan balik di industri masih didominasi oleh pengontrol PID (Takatsu, Itoh, & Araki, 1998). Pada setiap perangkat kontrol di industri, seperti: *Distributed Control Systems (DCS)* maupun *Programmable Logic Controller (PLC)* selalu tersedia pengontrol PID dengan tambahan fitur oto-tala (*auto-tuning*) untuk memudahkan operator menjalankan sistem kontrol umpan balik dengan PID. Daya tarik utama dari pengontrol PID adalah pengontrol ini dapat dioperasikan oleh operator yang tidak mempunyai pengetahuan tentang teori atau teknik kontrol otomatis. Operator cukup berbekal pengalaman terhadap karakteristik proses yang dikontrol. Berdasarkan pengetahuan ini, operator dapat menentukan parameter-parameter pengontrol PID secara coba-coba dengan hasil yang memuaskan (Joelianto, 2011).

Meskipun demikian, telah diketahui bahwa suatu pengontrol satu derajat kebebasan (*one-degree of freedom controller*) seperti pengontrol PID yang biasa terdapat pada DCS dan PLC tidak dapat ditala secara optimal untuk menghasilkan kinerja yang bagus secara serentak untuk masalah perubahan sinyal referensi (*set-point*) dan masalah gangguan beban (Astrom & Hagglund, 1995; Joelianto, 2000). Keputusan harus dilakukan dengan membuat salah satu kinerja transien dipilih optimal dan mengorbankan yang lain. Hal ini mengakibatkan proses penalaan menjadi rumit dan mahal, karena untuk setiap kinerja (perubahan sinyal referensi atau perubahan beban) harus dilakukan penalaan secara terpisah (Shinskey, 1996; Smith & Corripio, 2005).

6.1 Kontrol Referensi Hibrida dengan Logika Fuzzy

Perbaikan kinerja respons transien pengontrol PID dilakukan dengan menambahkan suatu sistem kontrol untuk mengubah perubahan sinyal referensi semu yang pada suatu saat harus beralih kembali ke sinyal referensi asalnya. objektif dari pengontrolan sinyal referensi hibrida adalah untuk

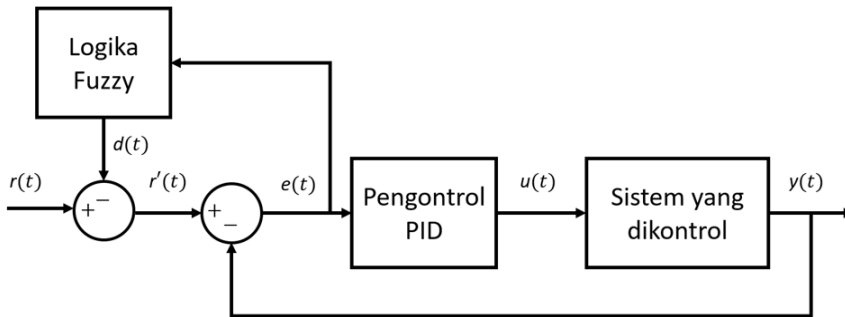
memperbaiki kinerja transien sistem kontrol umpan balik PID terhadap sinyal referensi asal (Joelianto & Williamson, 1997; Joelianto & Williamson, 2009). Sistem kontrol sinyal referensi ini menggunakan informasi sinyal kesalahan $e(t) \triangleq (r(t) - y(t))$ untuk selanjutnya akan diolah dengan menggunakan logika fuzzy untuk menentukan sinyal referensi semu yang sesuai sehingga respons transien terhadap perubahan sinyal referensi menjadi memenuhi spesifikasi dengan lebih baik. Setelah kesalahan antara keluaran proses dengan sinyal referensi asal memenuhi batas toleransi yang ditetapkan (misal $|e(t)| \leq \varepsilon$, dengan ε cukup kecil), maka sistem kontrol sinyal referensi berbasis fuzzy berhenti mengubah sinyal referensi semu dan mengembalikannya ke sinyal referensi asal.

Diagram blok sistem kontrol sinyal referensi hibrida berbasis logika fuzzy dengan pengontrol PID diperlihatkan oleh Gambar 6.1 (Joelianto & Tansri, 2007) di halaman berikutnya. Sistem kontrol hibrida ini terdiri atas sistem kontrol lup tertutup dengan pengontrol PID yang bekerja secara kontinu dan suatu mekanisme pengubah sinyal referensi yang dilakukan oleh aturan fuzzy untuk memberikan sinyal referensi semu pada kejadian diskrit (*discrete event*) (Joelianto & Williamson, 1997; Joelianto & Williamson, 2009). Pengontrolan sinyal referensi semu berlangsung selama kesalahan dipandang besar oleh mekanisme di aturan fuzzy dan mengembalikannya ke sinyal referensi asal jika kesalahan sudah kecil.

Mekanisme seperti ini termasuk sebagai sistem hibrida karena sinyal referensi bekerja secara diskrit, yaitu pada selang waktu tertentu sinyal referensi semu diubah jika kesalahan masih besar dan kemudian kembali ke sinyal referensi asal jika kesalahan sudah kecil pada setiap waktu cacah yang telah ditentukan. Kejadian diskrit terjadi pada setiap perubahan sinyal referensi selama kesalahan dapat terjadi pada selang waktu tertentu, demikian juga sinyal referensi asal dapat terjadi pada selang waktu yang lama ketika kesalahan tidak keluar dari toleransi kesalahan yang diperbolehkan.

Gambar 6.1 memperlihatkan skema sistem fuzzy sinyal referensi (*fuzzy set-point system*) dengan satu masukan kesalahan $e(t)$. Aturan fuzzy akan bekerja mengubah sinyal referensi asal (*original/default set-point*) ketika kesalahan $e(t)$ cukup besar. Sehingga, keluaran sistem yang dikontrol $y(t)$ akan kembali ke sinyal referensi asal atau yang baru dengan kinerja transien

yang optimal, misal lonjakan maksimum lebih kecil, waktu naik lebih cepat, waktu tunak lebih cepat, dan seterusnya.



Gambar 6.1 Diagram blok sistem kontrol referensi hibrida berbasis logika fuzzy

6.2 Perancangan Sistem Fuzzy Sinyal Referensi

Perancangan sistem keputusan berdasarkan logika fuzzy adalah untuk menentukan besarnya sinyal referensi semu yang akan diberikan kepada sistem kontrol lup tertutup. Tahap pertama ditentukan jumlah variabel masukan dan keluaran sistem logika fuzzy. Sistem fuzzy ini selanjutnya disebut sistem fuzzy sinyal referensi (*fuzzy set-point system*) yang pada kasus ini terdiri dari satu variabel masukan untuk fuzzy referensi satu masukan, dan masing-masing berasal dari sinyal kesalahan pada sistem orde satu dan orde dua. Agar keputusan dari sistem fuzzy sinyal referensi dapat menjalankan tahap-tahap dalam proses sistem inferensi fuzzy (*fuzzy inference system*) dan menghasilkan sinyal keluaran semu yang dapat mengontrol respons transien sistem lup tertutup yang dikontrol oleh pengontrol PID sesuai dengan yang diinginkan, perlu dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

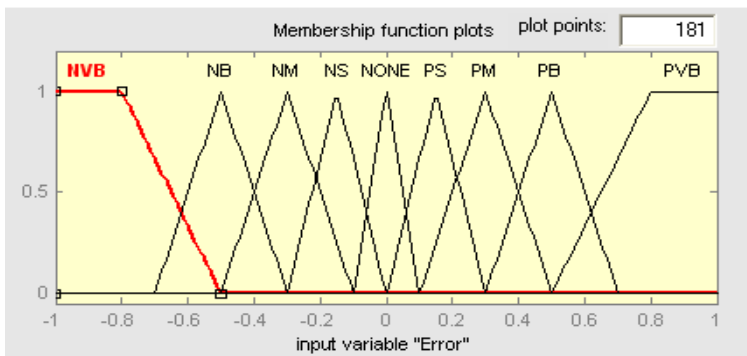
- Menentukan variabel masukan sistem fuzzy sinyal referensi beserta fungsi keanggotaannya.
- Menentukan variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi beserta fungsi keanggotaannya.
- Menentukan aturan jika - maka fuzzy yang menentukan hubungan masukan dan keluaran sistem keputusan.

6.3 Variabel Masukan Sistem Fuzzy Sinyal Referensi

Perancangan logika fuzzy pada sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem berorde satu dan berorde dua dengan waktu mati dibahas pada bagian berikut (Joelianto & Tansri, 2007).

1. Sistem orde satu

Grafik fungsi keanggotaan sistem fuzzy sinyal referensi dengan satu variabel masukan diperlihatkan Gambar 6.2. Variabel masukan adalah sinyal kesalahan $e(t)$ yang dibatasi -1 sampai 1 sebagai semesta pembicaraannya. Berdasarkan pelatihan, fungsi keanggotaan fuzzy disusun dan digambarkan oleh tujuh fungsi keanggotaan segitiga yang mewakili himpunan fuzzy: *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *NONE*, *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), *Positive Big* (PB), dan dua fungsi keanggotaan trapesium yang mewakili himpunan fuzzy: *Positive Very Big* (PVB) dan *Negative Very Big* (NVB).



Gambar 6.2 Grafik variabel masukan pada sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan sistem orde satu

2. Sistem orde dua

Variabel masukan dan fungsi keanggotaan sistem fuzzy sinyal referensi pada sistem orde dua memakai variabel masukan fuzzy yang sama seperti sistem orde satu, yaitu menggunakan sinyal kesalahan $e(t)$ dan fungsi keanggotaan berbentuk segitiga dan trapesium seperti diperlihatkan oleh Gambar 6.2.

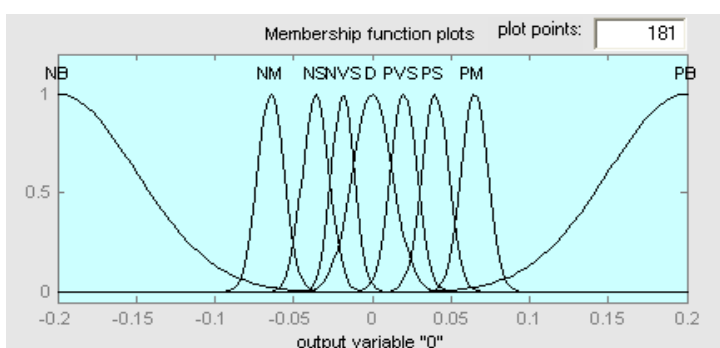
6.4 Variabel Keluaran Sistem Fuzzy Sinyal Referensi

Keluaran logika fuzzy pada sistem fuzzy sinyal referensi dengan satu masukan pada sistem berorde satu dan berorde dua dengan waktu mati menggunakan

variabel dan fungsi keanggotaan yang berbeda dengan variabel masukan (Joelianto & Tansri, 2007).

1. Sistem orde satu

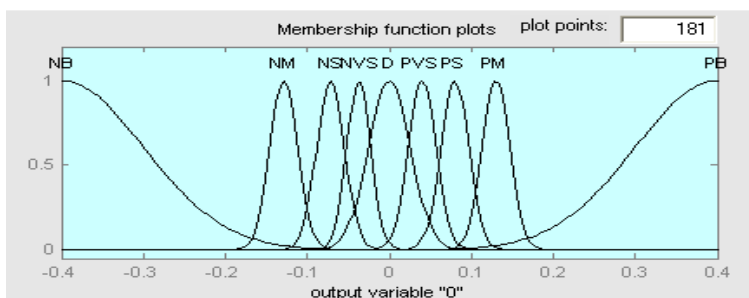
Pada variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi memiliki tujuh variabel, yaitu: *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Negative Very Small* (NVS), *Default* (D), *Positive Very Small* (PVS), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM) dan *Positive Big* (PB) dengan menggunakan fungsi keanggotaan Gaussian, seperti Gambar 6.3. Variabel keluaran fuzzy dibatasi pada nilai antara -0,2 sampai 0,2 sebagai semesta pembicaraannya.



Gambar 6.3 Grafik variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem orde satu

2. Sistem orde dua

Pada variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi memiliki tujuh variabel, yaitu: *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Negative Very Small* (NVS), *Default* (D), *Positive Very Small* (PVS), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM) dan *Positive Big* (PB) dengan menggunakan fungsi keanggotaan Gaussian. Gambar 6.4 memperlihatkan variabel keluaran fuzzy dibatasi pada nilai antara -0.4 sampai 0.4 sebagai semesta pembicaraannya.



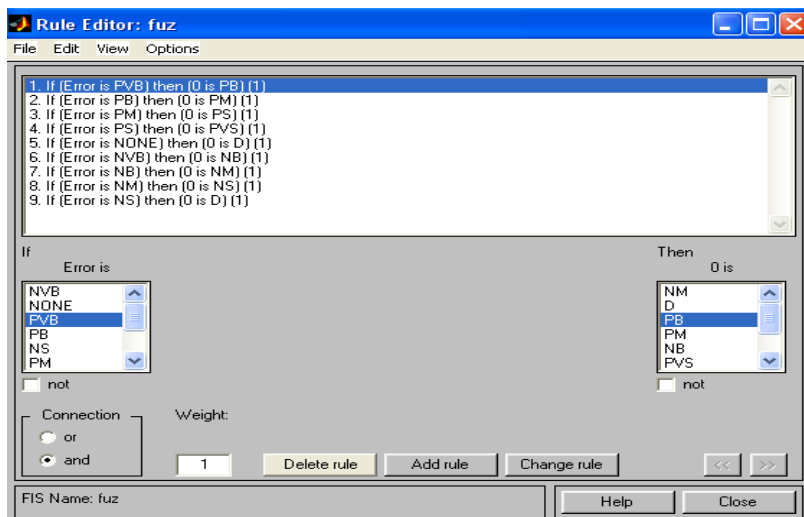
Gambar 6.4 Grafik variabel keluaran sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem orde dua

6.5 Aturan Fuzzy Jika - Maka

Cara penentuan aturan fuzzy jika-maka adalah dengan menerapkan cara berpikir sesuai logika manusia dalam pernyataan jika-maka (Joelianto & Tansri, 2007). Konsep pemikiran manusia yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Sinyal kesalahan didapat dari pengurangan sinyal referensi asal dengan sinyal keluaran sistem.
2. Jika sinyal kesalahan kecil maka diberi sinyal referensi semu yang besar, jika sinyal kesalahan besar maka diberi sinyal referensi semu yang mendekati sinyal referensi asal dan jika kesalahan melebihi sinyal referensi asal maka di beri sinyal referensi asal.
3. Sistem fuzzy sinyal referensi akan mengakibatkan sinyal kontrol yang dihasilkan oleh pengontrol PID memperbaiki waktu naik dan meminimalkan lonjakan maksimum dari respons transien keluaran sistem lup tertutup.

Pengkombinasian himpunan-himpunan fuzzy pada masukan dan keluaran sistem fuzzy sinyal referensi menghasilkan 9 aturan fuzzy satu masukan jika-maka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.5, berlaku untuk sistem orde satu dan dua.



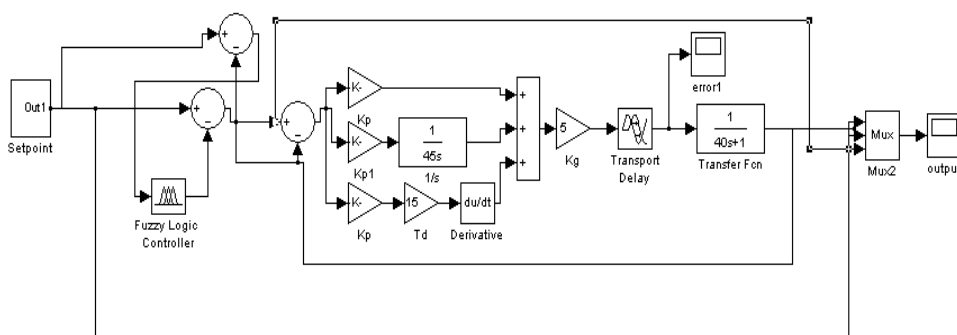
Gambar 6.5 Aturan fuzzy untuk satu masukan pada Rule Editor MATLAB

Perbaikan kinerja respons transien sistem kontrol dengan pengontrol PID dilakukan dengan menggunakan sistem fuzzy sinyal referensi yang

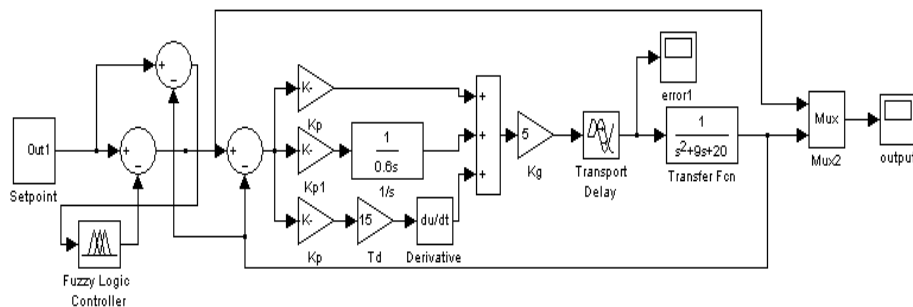
menjalankan 5 tahap dalam proses *Fuzzy Inference System (FIS)* tipe Mamdani. Fuzzifikasi masukan dilakukan dengan menggunakan pemfuzzifikasi pemetaan *singleton*. Selanjutnya, aplikasi operator keluaran fuzzy menggunakan AND (MIN), OR (MAX) dan NOT. Implikasi keluaran menggunakan operator implikasi MIN Mamdani. Metode agregasi yang digunakan adalah agregasi keluaran MAX dan defuzzifikasi pusat masa (*centroid*). Bobot yang digunakan pada setiap aturan adalah satu. Selanjutnya dibuat beberapa pola aturan jika-maka dari sistem fuzzy untuk menghasilkan perbaikan waktu tunak (T_s), lonjakan maksimum (M_p), dan energi kontrol. Pola aturan yang sesuai diperlihatkan pada Gambar 6.5.

6.6 Simulasi

Dalam simulasi ini (Joelianto & Tansri, 2007), sistem fuzzy sinyal referensi dengan satu masukan bekerja pada kejadian diskrit. Sedangkan pengontrol PID menggunakan nilai parameter-parameter yang telah didapatkan di atas bekerja berdasarkan waktu kontinu. Gabungan keduanya membentuk sistem kontrol referensi hibrida berbasis logika fuzzy yang mampu memperbaiki respons transien dibanding jika hanya menggunakan pengontrol PID saja. Simulasi dilakukan untuk sistem orde satu dan orde dua dengan waktu mati sebesar 30 detik. Diagram blok simulasi diperlihatkan oleh Gambar 6.6 dan Gambar 6.7 berikut ini.

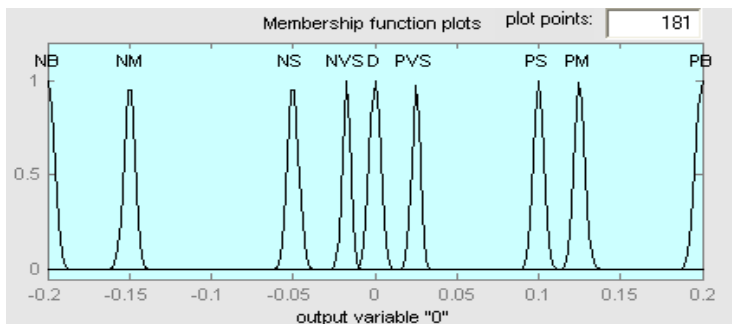


Gambar 6.6 Diagram blok Simulink untuk sistem orde satu

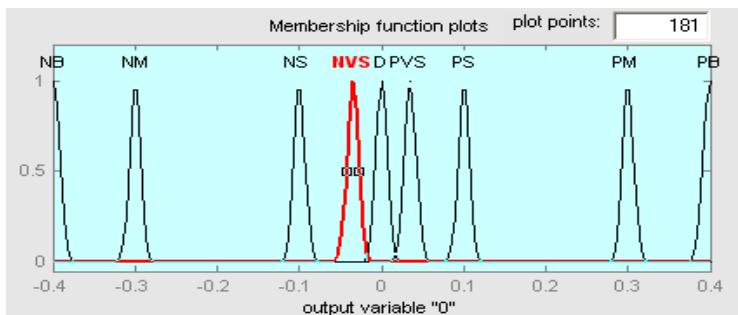


Gambar 6.7 Diagram blok Simulink untuk sistem orde dua

Pada simulasi dipilih sinyal referensi asal berupa sinyal tangga dan ditetapkan mempunyai amplituda sebesar 1. Simulasi ini dijalankan dengan menggabungkan pengontrol PID dan pengontrol sistem fuzzy sinyal referensi dalam Simulink Matlab versi 6.5. Fungsi keanggotaan variabel keluaran fuzzy mengalami pergeseran nilai setelah digabungkan dengan aturan fuzzy jika - maka untuk mencapai perbaikan respons transien yang diinginkan. Perubahan nilai fungsi keanggotaan untuk setiap pengontrol sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem orde satu dan orde dua dengan waktu mati diperlihatkan pada Gambar 6.8 dan Gambar 6.9 berikut ini.



Gambar 6.8 Grafik akhir variabel keluaran fuzzy satu masukan pada sistem orde satu



Gambar 6.9 Grafik akhir variabel keluaran fuzzy satu masukan pada sistem orde dua

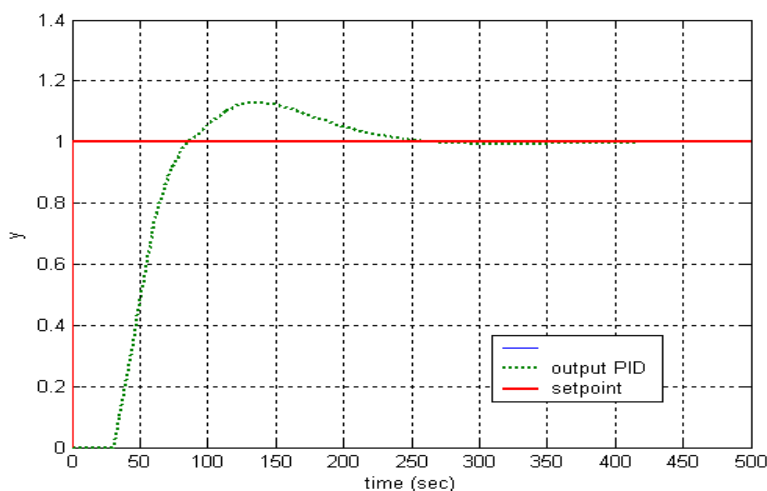
- **Simulasi pengontrol sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan pada sistem orde satu.**

Fungsi alih sistem orde satu dengan waktu mati pada simulasi diberikan oleh persamaan (6.1) berikut.

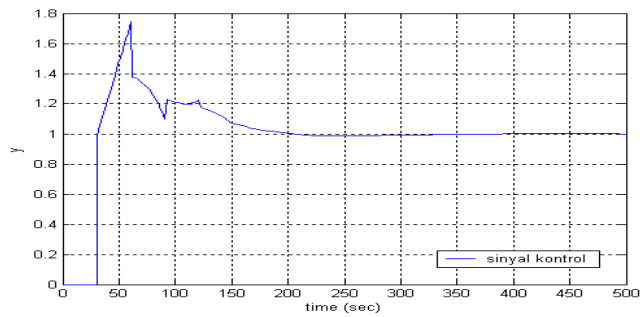
$$G(s) = \frac{5e^{-30s}}{40s + 1} \quad (6.1)$$

Parameter PID pada sistem orde satu ditala dengan metode coba-coba didapatkan beberapa harga harga K_p , T_i dan T_d , dengan respons keluaran yang sesuai dengan kriteria yang diinginkan. Dari hasil penalaran coba-coba, harga parameter-parameter PID dipilih yang memiliki waktu naik (T_r) paling cepat dan harga lonjakan maksimum sudah memenuhi di bawah 20%, yaitu: $K_p = 0,2$, $T_i = 45$ detik dan $T_d = 15$ detik.

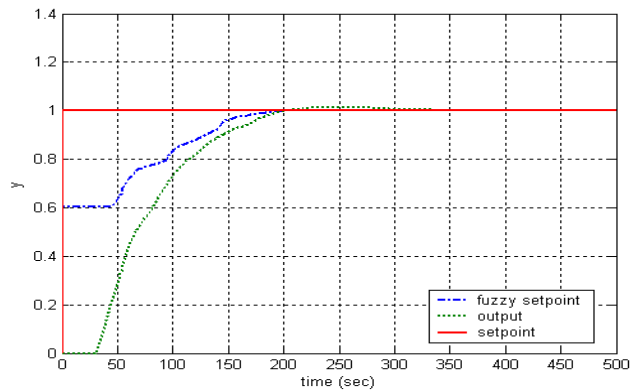
Gambar 6.10 dan Gambar 6.11 memperlihatkan kinerja respons transien sistem kontrol lup tertutup dengan pengontrol PID. Gambar 6.12 dan 6.13 memperlihatkan respons transien, bentuk sinyal referensi semu dan sinyal kontrol yang dihasilkan dengan menggunakan pengontrol PID sebagai sistem kontrol umpan balik dengan sistem fuzzy sinyal referensi (Joelianto & Tansri, 2007).



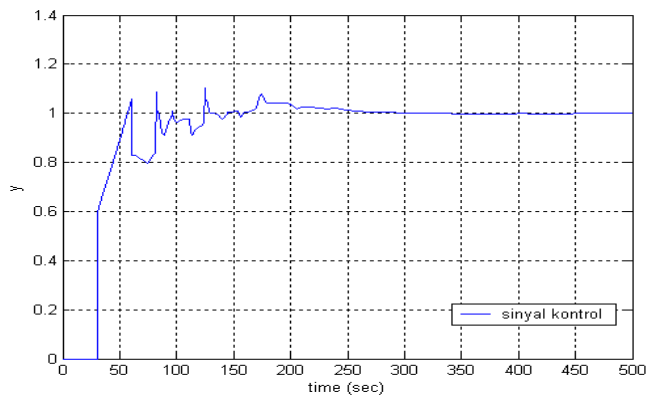
Gambar 6.10 Respons keluaran sistem orde satu dengan pengontrol PID



Gambar 6.11 Sinyal kontrol $u(t)$ pengontrol PID pada sistem orde satu



Gambar 6.12 Respons keluaran sistem orde satu dengan sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan



Gambar 6.13 Sinyal kontrol $u(t)$ dengan sistem fuzzy sinyal referensi satu masukan

Tabel 6.1 Data pengamatan kinerja respons transien

Pengontrol	Sinyal referensi	$Tr(s)$	$Td(s)$	$Tp(s)$	$Ts(s)$	$M_p(\%)$	$\int u^2(t) dt$
PID	1	87,4	61,2	152,38	272,38	11	1,08
Sistem Kontrol Hibrida	1	184,05	72,9	238,9	308,94	1	0,911

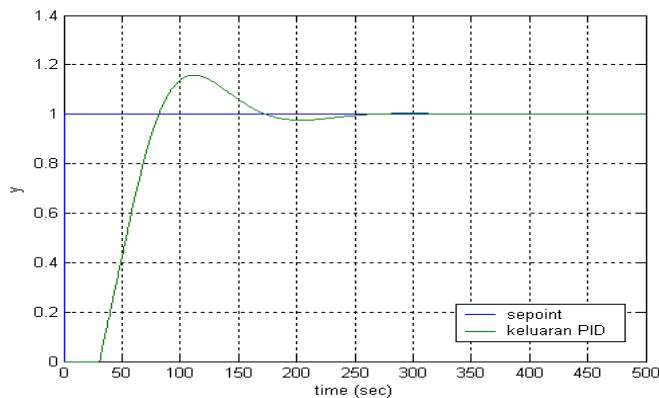
Data pengamatan memperlihatkan bahwa sistem kontrol referensi hibrida berbasis logika fuzzy mampu memperbaiki respons transien dengan menurunkan harga lonjakan maksimum M_p dari 11% menjadi 1%. Namun waktu naik T_p membesar menjadi 51%, waktu tunak T_s lebih cepat 11%, dan energi kontrol $\int u^2(t)dt$ turun sebesar 15,7% dibandingkan dengan pengontrol PID saja.

- **Simulasi sistem kontrol hibrida sinyal referensi berbasis logika fuzzy pada sistem orde dua dengan waktu mati 30 detik.**

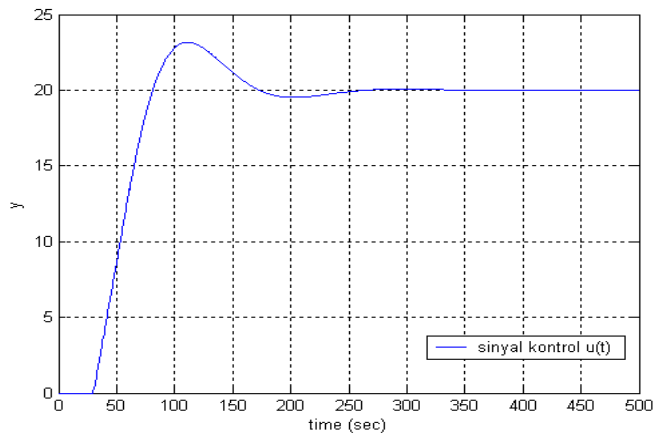
Sistem yang dikontrol berorde dua dituliskan dalam fungsi alih sebagai berikut (Joelianto & Tansri, 2007)

$$G(s) = \frac{5e^{-30s}}{s^2 + 9s + 20}. \quad (6.2)$$

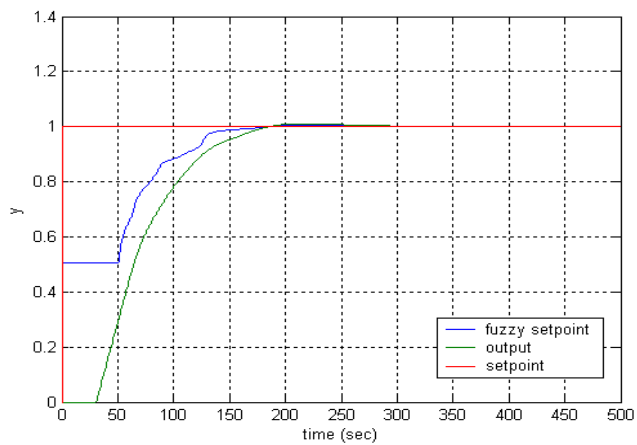
Parameter PID dicari dengan menggunakan metode coba-coba, sehingga didapat nilai parameter-parameter $K_p = 0,05$, $T_i = 0,6$ detik dan $T_d = 15$ detik. Gambar 6.14 memperlihatkan respons transien keluaran dengan pengontrol PID yang stabil berosilasi, Gambar 6.15 memperlihatkan sinyal kontrol yang digunakan. Gambar 6.16 memperlihatkan respons transien sistem kontrol PID dengan kontrol referensi hibrida berbasis logika fuzzy dan Gambar 6.17 memperlihatkan sinyal kontrol yang digunakan.



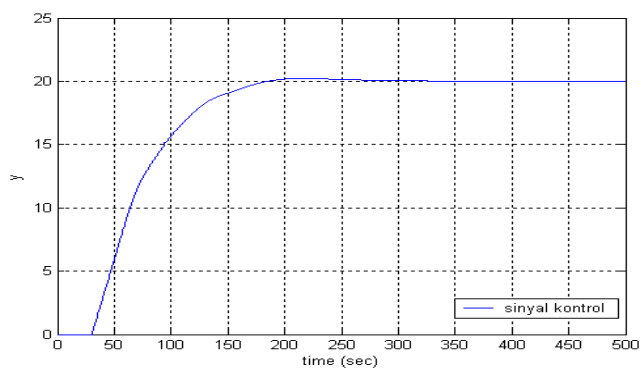
Gambar 6.14 Respons keluaran orde dua dengan pengontrol PID



Gambar 6.15 Sinyal kontrol $u(t)$ orde dua dengan pengontrol PID



Gambar 6.16 Respons keluaran orde dua sistem kontrol hibrida sinyal referensi berbasis logika fuzzy satu masukan



Gambar 6.17 Sinyal kontrol $u(t)$ orde dua sistem kontrol hibrida sinyal referensi berbasis logika fuzzy satu masukan

Tabel 6.2 Data pengamatan kinerja respons transien

Pengontrol	Sinyal referensi	Tr(s)	Td(s)	Tp(s)	Ts(s)	M _p (%)	$\int u^2(t) dt$
PID	1	60,96	47,58	97,51	246,46	11,37	21,76
Sistem Kontrol Hibrida	1	126,48	64,38	218,31	178,56	0	20,89

Tabel 6.2 memperlihatkan bahwa kinerja respons keluaran pengontrol hibrida sinyal referensi berbasis logika fuzzy yang dihasilkan pada sistem orde dua lebih baik dibandingkan respons keluaran pada sistem orde satu. Respons keluaran PID sistem orde dua dengan harga M_p sebesar 0%, nilai T_s diperbaiki lebih cepat 27,55%, tetapi terjadi penurunan T_r sebesar 50%, dan energi pengontrolan turun sebesar 0,03% dibandingkan pengontrol PID .

6.7 Implementasi KRH pada Motor-AC

Pengontrol KRH berbasis logika fuzzy dengan pengontrol PID telah direalisasikan pada pengontrol mikro (*micro controller*) untuk peningkatan kinerja motor-AC seperti diperlihatkan pada Gambar 6.18 di halaman berikut. Pengontrol KRH diaplikasikan untuk meningkatkan kinerja pengontrol PID yang telah ada pada inverter motor-AC.

6.8 Penelitian Lanjutan KRH berbasis Sistem Kecerdasan

Pengontrol KRH masih dapat dikembangkan dengan menerapkan metode fuzzy dengan pengelompokan (*clustering*) (Joelianto & Sitanggang, 2009). Metode pengelompokan substraktif (*subtractive clustering*) membantu dalam menentukan jumlah keanggotaan logika fuzzy berdasarkan data pelatihan yang diberikan. Sehingga logika fuzzy yang digunakan akan memiliki fitur yang sesuai dengan perilaku dinamika yang terpendam dalam data pelatihan. Oleh karenanya, KRH lebih mampu menghasilkan kinerja yang maksimal.

Perkembangan lanjut dalam sistem cerdas adalah penggabungan antara logika fuzzy dengan jaringan syaraf tiruan menjadi *Adaptive Neuro - Fuzzy Inference System (ANFIS)*. Fitur pembelajaran propagasi balik mampu mengoptimalkan fungsi keanggotaan fuzzy dibandingkan dengan cara coba-coba dan pengelompokan. Metode ini mempunyai kemampuan pendekatan

yang lebih baik pada pembentukan fungsi keanggotaan fuzzy, sehingga memberikan kedekatan perilaku dinamik yang diaproksimasi. Penggabungan KRH dengan ANFIS pada peningkatan kinerja pengontrol PID telah diterbitkan pada publikasi internasional (Joelianto, Anura, & Priyanto, 2013).





PENGONTROL VARIABLE SPEED DRIVE (VSD) CERDAS, OPTIMAL DAN EFISIEN (INTELLIGENT, OPTIMAL AND EFFICIENT VARIABLE SPEED DRIVE (VSD) CONTROLLER)

Perfektas Juli Desember 2015

Ir. Endra Joelianto, PhD.
KK Instrumentasi dan Kontrol
Fakultas Teknologi Industri - ITB

PROLOG:

iVSD merupakan sistem kontrol kecepatan motor AC yang berbasis sistem kontrol cerdas (intelligent control system) menggunakan metoda Fuzzy Hybrid Reference Control (HRC). iVSD dibangun dengan menggunakan pengontrol mikro dan dilengkapi dengan rangkaian antar muka analog. Perangkat iVSD dapat langsung dihubungkan ke inverter atau VSD untuk mengontrol kecepatan motor AC dengan kinerja kontrol yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan inverter atau VSD saja. Keunggulan yang diberikan oleh iVSD adalah penggunaan energi yang lebih efisien, kinerja kontrol yang lebih baik dan juga lebih cepat merespon permintaan perubahan kecepatan putar.

FIGURE:

iVSD memiliki beberapa fitur yang memudahkan pengguna untuk mengontrol kecepatan motor AC, seperti:

1. Mode pengubahan perintah kecepatan putar
2. Mode pilihan pengontrol cerdas atau PID
3. Mode pengubahan parameter pengontrol PID
4. Sinyal masukan dan keluaran kompatibel dengan inverter atau VSD
5. Dimensi kotak pengontrol adalah 12cm x 8,5cm x 5cm



UCAPAN TERIMA KASIH: Bekerja didanai oleh Program Riset Inovasi-ITB 2015, LPiK

ITB CEO SUMMIT on Innovation 26 Agustus 2016, Aula Barat-ITB
Gambar 6.18 Purwarupa pengontrol KRH Fuzzy dengan pengontrol mikro

7. KONTROL LALU LINTAS PERKOTAAN DENGAN PEMBELAJARAN PENGUATAN

Istilah kota pintar (*smart city*) kini semakin luas dan sering digunakan, istilah ini mengacu pada penggunaan teknologi informasi dan komunikasi untuk merasakan, menganalisis, dan mengintegrasikan informasi penting dari sistem utama di kota-kota yang beroperasi. Di antara berbagai tujuan penting dari kota pintar, pembangunan sistem transportasi cerdas dan sistem manajemen perkotaan cerdas adalah dua tujuan utama yang secara signifikan dapat memengaruhi kehidupan penduduk di kota-kota masa depan yang bebas kemacetan (Nagy & Simon, 2018). Di kota-kota di dunia, jumlah kendaraan terus meningkat yang berakibat pada banyaknya kendaraan yang menggunakan infrastruktur jalan raya. Permasalahan yang dihadapi dalam lalu lintas adalah terjadinya kemacetan (*congestion*) karena penyumbatan (*bottlenecks*) atau fenomena tumpahan (*spillbacks*).

Berdasarkan data yang dirilis oleh TomTom Traffic Index tahun 2019 (TomTom, 2019), kota Jakarta di Indonesia menduduki peringkat 10 dari 416 kota macet di dunia dengan tingkat kemacetan sebesar 53%. Pada tahun 2020, Jakarta turun ke peringkat ke-31 dengan rata-rata tingkat kemacetan sebesar 36%. Nilai persentase ini mewakili jumlah rata-rata waktu tambahan yang diperlukan untuk melakukan perjalanan. Misalnya pada tahun 2020, perjalanan yang biasanya ditempuh dengan waktu 30 menit akan memakan waktu 30 menit ditambah 36%, yaitu sekitar 40,8 menit. Angka tersebut pada tahun 2020 mengalami penurunan akibat adanya pembatasan aktivitas di masa pandemi Covid-19. Angka tersebut kemungkinan akan kembali meningkat pasca pencabutan pembatasan aktivitas.

7.1 Kemacetan dan Rekayasa Lalu Lintas

Sejumlah rekayasa jalan telah dilakukan untuk menghindari kemacetan jaringan lalu lintas, salah satu yang umum digunakan adalah pengontrolan lalu lintas. Gambar 7.1 mengilustrasikan kemacetan di kota Jakarta. Pengontrolan lalu lintas memerlukan model dinamis yang dapat menangkap evolusi antrean di persimpangan lokal. Pengontrolan lalu lintas pada jaringan lalu lintas akan mengaktifkan fase-fase dalam celah (*slot*) waktu. Gambar 7.2 mengilustrasikan elemen dasar dari lup kontrol lalu lintas (Papageorgiou,

Diakaki, Dinopoulou, Kotsialos, & Wang, 2003). Masukan kontrol dihubungkan ke perangkat kontrol yang disebut aktuator, seperti lampu lalu lintas, rambu pesan variabel, dll.. Masukan kontrol dipilih berdasarkan kontrol yang diperbolehkan di area tersebut seperti arus lalu lintas, kepadatan, atau waktu perjalanan. Keluaran atau kinerja jaringan diukur melalui indeks yang sesuai, seperti total waktu yang dihabiskan oleh semua kendaraan di jaringan dalam jangka waktu tertentu atau Diagram Fundamental Makroskopik (DFM) (*Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)*) yang akhir-akhir ini sering digunakan (Geroliminis & Daganzo, 2008; Knoop, Hoogendoorn, & Van Lint, 2012; Wahaballa, Hemdan, & Kurauchi, 2018; Joelianto dkk., 2022b; Ambühl, Menendez, & González, 2023).

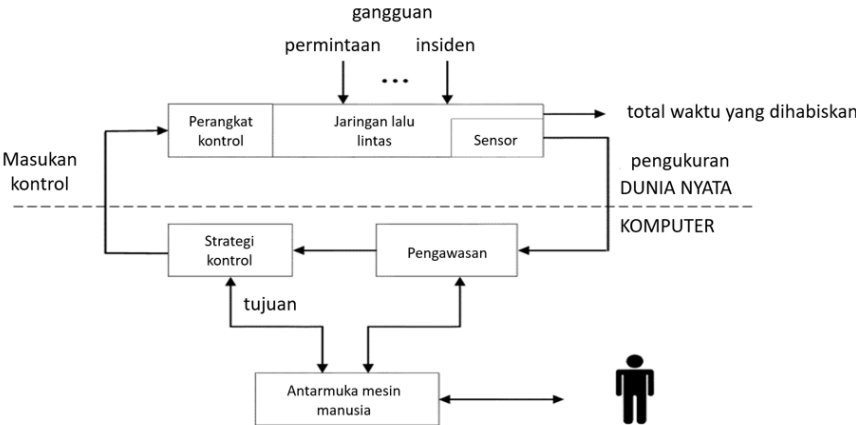


Gambar 7.1 Kemacetan di Kota Jakarta

(Sumber: <https://indonesiaexpat.id/featured/president-announces-capital-city-relocation-will-it-solve-jakartas-traffic-and-congestion/>) diakses 30 Agustus 2023.

Penelitian mengenai masalah pengontrolan sinyal lalu lintas di persimpangan telah banyak diteliti. Pedoman pengaturan sinyal lalu lintas pertama kali diterbitkan oleh Webster (1958). Sejumlah simulator lalu lintas juga telah dikembangkan untuk mengoptimalkan pengaturan sinyal lalu lintas, antara lain: SUMO (Behrisch, Bieker, Erdmann, & Krajzewicz, 2011; Shamim Akhter dkk., 2020; Monga & Mehta, 2022) dan VISSIM (Fellendorf, 1994; Ramadhan, Joelianto, & Sutarto, 2019; Haq, Farid, & Ksaibati, 2022). Tekanan maks (TM) (*Max Pressure*) adalah suatu kebijakan kontrol jaringan terdistribusi yang berasal dari konsep pengontrol tekanan balik (*backpressure*), pertama kali dipelajari dalam konteks perutean paket (Eom & Kim, 2020).

Studi terapan pertama dari konsep perutean tekanan balik untuk aplikasi lalu lintas diperkenalkan dalam (Wongpiromsarn, Uthaicharoenpong, Wang, Frazzoli, & Wang, 2012; Varaiya, 2013a). Analisis teoretis telah dilakukan untuk mendapatkan persamaan kapasitas lalu lintas. Beberapa solusi telah diusulkan untuk mengoptimalkan pengoperasian simpang bersinyal (Kumaravel & Ayyagari, 2021). Teori tekanan maks diperkenalkan oleh (Varaiya, 2013b), dan menawarkan jaminan waktu hijau minimum dan mempertimbangkan antrean berbobot di persimpangan.



Gambar 7.2 Lup kontrol lalu lintas

Algoritme tekanan maks mengembangkan pengontrol sinyal lalu lintas panjang fase dinamis asiklik (Genders & Razavi, 2019). Modifikasi terhadap bobot tekanan maksimal juga dilakukan di referensi (Kouvelas, Lioris, Fayazi, & Varaiya, 2014). Panjang antrean digunakan sebagai variabel masukan dalam algoritme tekanan maks asli. Karena kesulitan dalam mengukur atau memperkirakannya secara waktu nyata dengan teknologi sensor arus (Joelianto dkk., 2022a), waktu tempuh (Mercader, Uwayid, & Haddad, 2020) dan waktu tunda (Liu & Gayah, 2023) dianggap sebagai variabel masukan. Pengembangan strategi pengontrolan lalu lintas dilakukan dengan tujuan meminimalkan penalaan parameter sekaligus memastikan kinerja yang memuaskan pada kemampuan tekanan maks untuk menghindari kondisi *gridlock* untuk bagian jaringan (*subnetwork*). Selain itu, perbandingan kinerja antara tekanan maksimal berbasis siklus dan berbasis penetapan (*slotted*) (Tassiulas & Ephremides, 1990). Penelitian oleh Joelianto dkk. (2022b) secara khusus mempelajari kinerja tekanan maks menggunakan Diagram Fundamental Makroskopik (DFM) menunjukkan bahwa kontrol tekanan maks

tidak sensitif terhadap variasi rasio putaran (*turning ratio*) sampai batas tertentu.

Namun pada masalah tekanan maksimal, dengan mengatur tujuan sebagai minimalisasi di persimpangan, TM telah terbukti memaksimalkan keluaran (*throughput*) dalam jaringan, tetapi solusi bersifat serakah (*greedy*) yang mengarah pada solusi optimal secara lokal (Wei dkk., 2019). Baru-baru ini, pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) telah dipelajari untuk sistem transportasi. Sama seperti tekanan maks, pembelajaran penguatan adalah masalah optimisasi dengan pengaturan imbalan dari pencarian coba-coba. Dengan menetapkan hadiah (*reward*) sebagai fungsi tekanan, hasil yang sama akan diberikan sebagai tekanan maksimal (Boukerche, Zhong, & Sun, 2021). Tekanan berasal dari tekanan maksimal (Varaiya, 2013b) dari deteksi waktu nyata perbedaan antara panjang antrean kendaraan masuk dan keluar persimpangan, kemudian mengaktifkan bagian yang bertekanan terbesar.

7.2 Algoritme Kontrol Klasik

Dalam kontrol lalu lintas terdapat beberapa algoritme kontrol klasik yang dapat digunakan. Umumnya algoritme menekankan pada kontrol lampu hijau di persimpangan yang dimodelkan. Kontrol lampu hijau yang dimaksud adalah menentukan lama pembagian durasi aktif lampu hijau (berbasis siklus) serta giliran fase lalu lintas aktif (berbasis celah (*slot*)) untuk tiap persimpangan. Beberapa algoritme kontrol klasik yang dikenal adalah sebagai berikut.

- **Seragam (*Uniform*)**

Algoritme kontrol seragam (*uniform*) merupakan algoritme kontrol lalu lintas berbasis siklus yang membagi waktu aktif lampu hijau secara merata kepada setiap fase lalu lintas di persimpangan. Algoritme kontrol seragam sering dijadikan patokan untuk membandingkan kinerja metode kontrol lalu lintas yang dikembangkan.

- **Webster**

Algoritme kontrol Webster diajukan oleh F. Webster pada tahun 1958 (Webster, 1958). Metode Webster digunakan untuk menghitung panjang siklus optimal dari setiap fase di satu persimpangan. Metode Webster dapat digunakan pada aplikasi waktu nyata dengan mengambil sedikit data terlebih

dahulu dan dengan mengasumsikan tidak akan terjadi fluktuasi keadaan secara mendadak, dengan kata lain metode Webster melakukan perhitungan dengan asumsi keadaan lalu lintas tunak (*steady state*).

Persamaan berikut digunakan untuk menghitung panjang siklus optimal dalam satuan detik (C)

$$C = \frac{(1,5 \times L_t) + 5}{1 - \sum_{i=1}^N Y_i} \quad (7.1)$$

Variabel N merupakan jumlah fase lalu lintas pada sebuah persimpangan. Variabel L_t melambangkan jumlah waktu terbuang (*lost time*) dalam sebuah siklus. Waktu terbuang dalam suatu siklus umumnya merupakan jumlah dari waktu terbuang di awal dan akhir siklus. Waktu terbuang di awal siklus merupakan waktu yang dibutuhkan oleh pengemudi pertama untuk bereaksi ketika lampu berganti dari merah ke hijau dikurangi rata – rata waktu yang dibutuhkan pengemudi lainnya dalam bereaksi (*constant headway time*), sedangkan waktu terbuang di akhir siklus merupakan kondisi seluruh lampu lalu lintas merah yang bertujuan untuk mencegah terjadinya penumpukan kendaraan di tengah persimpangan.

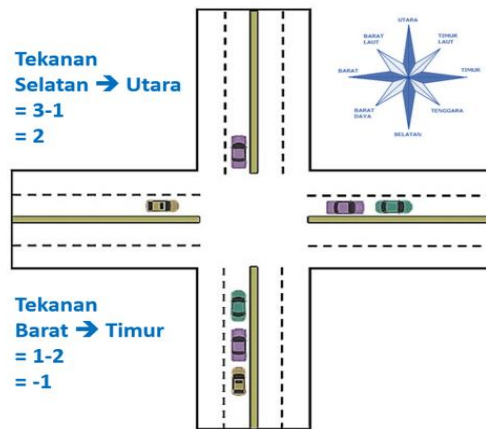
Variabel Y_i melambangkan laju aliran kritis fase ke- i yang merupakan nilai volume kendaraan (V_i) pada setiap fase yang dibagi dengan aliran kendaraan tersaturasi dalam sebuah jalur (sf) yang dikalikan dengan jumlah jalur masuk dalam fase tersebut (n_j) . Aliran kendaraan tersaturasi merupakan jumlah kendaraan yang dapat melalui sebuah fase lalu lintas jika fase tersebut diberikan waktu menyala selama satu jam tanpa henti (veh/hr) yang diubah ke satuan (veh/s)

$$Y_i = \frac{V_i}{sf \times n_j} \quad (7.2)$$

Urutan pergantian fase lalu lintas pada algoritme kontrol Webster adalah tetap. Setelah panjang siklus optimal ditentukan, waktu lampu hijau menyala dalam siklus akan dibagikan ke setiap fase dengan pembagian yang proporsional terhadap nilai Y_i setiap fase.

- **Tekanan Maks (Max Pressure)**

Teknik tekanan maks (TM) diajukan oleh Pravin Varaiya pada tahun 2013 (Varaiya, 2013b). Algoritme kontrol TM mengutamakan penyalaaan lampu hijau pada jalur atau fase dengan tekanan terbesar. Tekanan yang dimaksud adalah selisih antara panjang antrian masuk dan keluar pada sebuah ujung persimpangan (*approaches*), diperlihatkan Gambar 7.3 (Fuad dkk., 2022).



Gambar 7.3 Ilustrasi pendefinisian tekanan (*pressure*) pada sebuah persimpangan

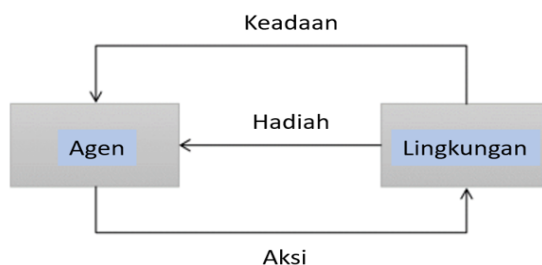
Tekanan sebuah fase lalu lintas (P_p) dapat dihitung dengan persamaan (7.3) (Hassan, Xuan, & Mashros, 2017)

$$P_p = \sum_{i \in L_{p,inc}} n_i - \sum_{k \in L_{p,out}} n_k \quad (7.3)$$

dengan n_i merupakan variabel jumlah kendaraan di jalur masuk (*upstream*) di sebuah kelompok jalur masuk fase lalu lintas yang dilambangkan dengan $L_{p,inc}$. Variabel lain n_k mewakili jumlah kendaraan di jalur keluar (*downstream*) di sebuah himpunan jalur keluar fase lalu lintas yang dilambangkan dengan $L_{p,out}$. Algoritme kontrol TM dapat meningkatkan keluaran dari sebuah persimpangan dengan menetapkan objektif pengontrol untuk meminimalkan tekanan (mengaktifkan fase dengan tekanan tertinggi). Akan tetapi solusi yang dihasilkan oleh algoritme kontrol TM cenderung menghasilkan solusi yang optimal secara lokal (Ramadhan, Sutarto, Kuswana, & Joelianto, 2020).

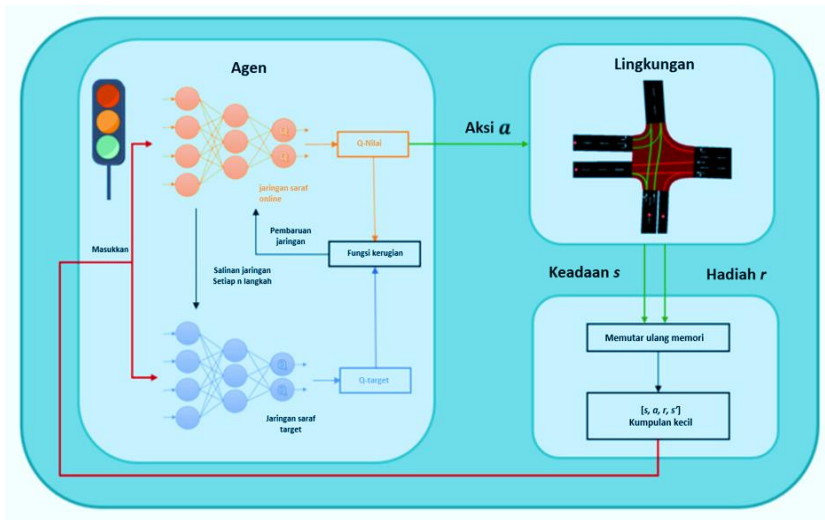
7.3 Pembelajaran Penguatan

Pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) adalah sebuah teknik pembelajaran mesin tambahan dengan konsep agen yang mampu memahami dan menafsirkan lingkungan (*environment*), mengambil aksi (*action*), dan belajar melalui coba-coba (*trial-and-error*) pada berbagai jenis lingkungan. Pembelajaran dilakukan bukan untuk memberitahu aksi yang harus diambil, tetapi sebaliknya yaitu harus menemukan aksi yang menghasilkan hadiah (*reward*) paling banyak dengan melakukan percobaan berbagai aksi yang tersedia (Osband, Blundell, Pritzel, & Van Roy, 2016). Terdapat dua prinsip pendekatan untuk memecahkan masalah pada pembelajaran penguatan. Pendekatan pertama, yaitu menemukan perilaku yang dapat bekerja baik di lingkungan dan pendekatan kedua, yaitu menggunakan teknik statistik dan teknik pemrograman dinamis untuk memperkirakan kegunaan dari pengambilan aksi di lingkungan. Elemen dasar pembelajaran penguatan yang terdiri dari hadiah (*reward*), keadaan (*state*), dan aksi (*action*) ditunjukkan oleh Gambar 7.4.



Gambar 7.4 Struktur dasar pembelajaran penguatan

Pada pengontrolan lalu lintas digunakan algoritme pembelajaran penguatan dengan metode aproksimasi nilai Q (*Q-value*) berupa *Deep Q-Network (DQN)*. DQN dipilih karena kemungkinan variasi jumlah keadaan sangat banyak (data kontinu), aksi berjumlah lebih dari satu, dan setiap simpang akan dikontrol satu agen (multi-agen) sehingga akan sangat membutuhkan waktu apabila menghitung nilai-Q menggunakan persamaan Bellman biasa. Oleh karena itu, multi-agen DQN digunakan untuk mengaproksimasi nilai-Q menggunakan jaringan syaraf (*neural network*) untuk mempercepat waktu komputasi. Ilustrasi rancangan agen pada algoritme DQN diperlihatkan oleh Gambar 7.5 (Fuad dkk., 2022).



Gambar 7.5 Ilustrasi implementasi DQN pada kasus kontrol lalu lintas

Rincian bagian yang menyusun agen DQN pada permasalahan desain sistem kontrol transportasi cerdas adalah sebagai berikut.

- **Keadaan (State):**
Jajaran (*array*) yang mengindikasikan fase hijau yang aktif saat ini, variabel biner yang menandakan waktu hijau minimum sudah terlewati atau belum, densitas kendaraan masuk pada setiap fase, dan panjang antrean kendaraan masuk pada setiap fase.
- **Aksi (Action):**
Fase lalu lintas (sebagian fase dapat dilihat pada referensi (Fuad dkk., 2022)).
- **Hadiah (Reward):**
Tekanan, misal digunakan $-P_i$ (P_i adalah tekanan dari persimpangan ke- i), dengan tekanan fase ditunjukkan oleh persamaan

$$P_p = \sum_{i \in L_p, inc} \left(\frac{n_i}{x_l} \right) - \sum_{k \in L_p, out} \left(\frac{n_k}{x_k} \right) \quad (7.4)$$

dan tekanan persimpangan merupakan jumlah dari mutlak tekanan setiap fase dari sebuah persimpangan lalu lintas.

$$P_p = \sum_{b=1}^B \left| \sum_{i \in L_p, inc} \left(\frac{n_i}{x_l} \right) - \sum_{k \in L_p, out} \left(\frac{n_k}{x_k} \right) \right|. \quad (7.5)$$

Variasi hadiah

Variasi hadiah dilakukan sebagai kombinasi antara total tekanan persimpangan dan total panjang antrean kendaraan dalam persimpangan dengan beban tekanan dan panjang antrean yang divariasikan. Variasi hadiah (r_i) dengan menambahkan beban pada panjang antrean dan tekanan dilakukan dengan persamaan sebagai berikut (Fuad dkk., 2022)

$$r_i = -(w_a \times P_t + w_b \times qu_t). \quad (7.6)$$

Variabel P_t melambangkan tekanan fase pada waktu ke- t dan variabel qu_t melambangkan panjang antrean di jalur masuk fase pada waktu ke- t . Nilai koefisien bobot w_a dan w_b masing-masing menunjukkan hadiah yang lebih diutamakan pada saat itu.

Tekanan merupakan jumlah kendaraan yang berada di jalur masuk (*upstream*) yang dikurangi oleh jumlah kendaraan yang berada di jalur keluar (*downstream*). Dalam model jaringan persimpangan jamak, properti jalur keluar sebuah persimpangan merupakan sebuah properti jalur masuk persimpangan yang ada di sekitar persimpangan tersebut. Dengan mempertimbangkan nilai tekanan untuk dijadikan hadiah maka agen DQN akan mempertimbangkan kondisi agen DQN lain yang berada di sekitarnya (persimpangan yang berhubungan langsung). Dengan melakukan variasi bobot hadiah yang diberikan ke agen DQN, akan diuji seberapa penting koordinasi antar-agen DQN yang berhubungan langsung dalam upaya meningkatkan performa makroskopik dari model jaringan lalu lintas.

Selain rancangan agen, terdapat juga rancangan dari jaringan syaraf. Model dari jaringan syaraf yang dibuat terdiri atas tiga lapisan padat (*dense*) dengan dua lapisan padat pertama terdiri dari 24 neuron, aktivasi ReLU, dan jumlah masukan lapisan padat awal sesuai dengan ukuran keadaan (*state*). Lapisan padat terakhir memiliki jumlah neuron sesuai dengan jumlah aksi dan menggunakan aktivasi linier. Metode perhitungan fungsi kerugian pada jaringan syaraf menggunakan Kesalahan Rata-Rata Kuadrat (KRR) (*Mean Squared Error (MSE)*) dan digunakan fungsi optimisasi berupa Adam dengan

kecepatan pembelajaran (*learning rate*) sebesar 0,001. Keluaran dari jaringan syaraf berupa aproksimasi nilai-Q dari semua kemungkinan aksi yang ada. Nilai-Q ini kemudian akan diambil nilai paling maksimal dan dikalikan dengan faktor diskon (γ) sebesar 0,95. Hasil ini kemudian akan ditambah dengan hadiah dan dihitung fungsi kerugian (*loss function*) dengan nilai estimasi Q. Parameter pada jaringan daring (*online network*) akan diperbarui sesuai dengan parameter pada jaringan sasaran (*target network*) setiap 2000 langkah waktu (*time step*). Pada Bootstrapped DQN dipilih H heads sebanyak 3 sehingga nantinya pada setiap awal episode akan dipilih H secara acak seragam di antara ketiganya dan selama episode tersebut mengikuti kebijakan fungsi Q_h yang dipilih.

Pemilihan aksi dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu metode eksplorasi serakah- ϵ (ϵ -greedy) dan Boltzmann. Terdapat beberapa parameter pada eksplorasi serakah- ϵ , yaitu epsilon dengan nilai 1, epsilon peluruhan (*decay*) dengan nilai 0,995, dan epsilon minimum dengan nilai 0,01. Pada awal simulasi, agen akan memilih aksi secara acak (eksplorasi) apabila nilai acak yang muncul (penentuannya menggunakan `np.random.rand`) bernilai kurang atau sama dengan nilai epsilon-nya. Namun apabila nilai acak yang muncul bernilai lebih dari nilai epsilon maka agen akan memilih aksi dengan nilai-Q terbesar. Nilai epsilon akan menurun setiap langkah dengan nilai sebesar perkalian antara epsilon awal dengan epsilon peluruhan. Apabila nilai epsilon sudah mencapai batas minimum yaitu sebesar 0,01, maka agen akan berhenti melakukan eksplorasi dan akan memilih agen dengan nilai-Q terbesar (eksploitasi). Peralihan antara eksplorasi dan eksploitasi dan sebaliknya dalam algoritme memperlihatkan bahwa algoritme merupakan suatu sistem hibrida.

Metode eksplorasi Boltzmann hanya memiliki parameter temperatur τ dengan nilai sebesar 0,5. Parameter τ menggambarkan keaktifan suatu aksi. Semakin tinggi temperatur maka semua aksi hampir memiliki probabilitas yang sama sedangkan semakin rendah temperatur maka probabilitas dengan nilai Q maksimum akan bernilai satu. Nilai ini akan berpengaruh pada persamaan (7.7) dan agen akan memilih aksi dengan nilai-Q terbesar berdasarkan hasil perhitungan tersebut.

$$Sm_t(a) = \frac{e^{\left(\frac{q_t(a)}{\tau}\right)}}{\sum_{i=1}^n e^{\left(\frac{q_t(a)}{\tau}\right)}}. \quad (7.7)$$

7.4 Diagram Fundamental Makroskopik

Diagram Fundamental Makroskopik (DFM) telah dinilai berguna untuk mengevaluasi kinerja jaringan transportasi strategi dalam pengontrolan lalu lintas (Geroliminis & Daganzo, 2008; Knoop, Hoogendoorn, & Van Lint, 2012; Wahaballa, Hemdan, & Kurauchi, 2018; Joelianto dkk., 2022b; Ambühl, Menendez, & González, 2023). DFM diusulkan oleh Geroliminis & Daganzo (2008) yang secara empiris mengamati peran DFM di jaringan jalan Yokohama dengan menggunakan data dari detektor lup dan data GPS dari taksi. Kemudian, beberapa studi empiris (Geroliminis & Sun, 2011; Saberi & Mahmassani, 2012) dan simulasi (Ji, Daamen, Hoogendoorn, Hoogendoorn-Lanser, & Qian, 2010; Gayah, Gao, & Nagle, 2014) menggunakan DFM untuk mempelajari jaringan perkotaan dan jalan raya.

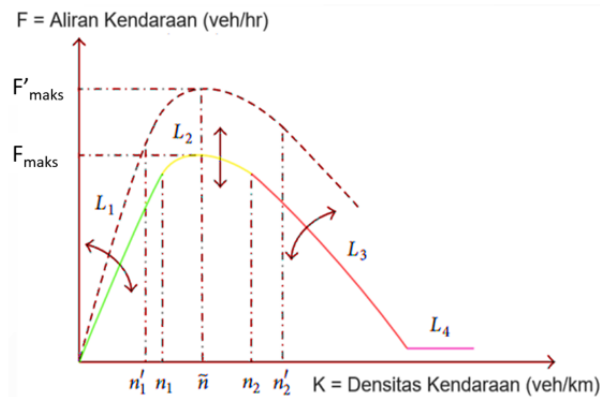
DFM merupakan sebuah grafik yang menggambarkan hubungan antara rata-rata aliran kendaraan di tiap jalur yang terdapat di jaringan lalu lintas (*network flow*, yang disimbolkan dengan F_t) terhadap rata-rata kepadatan lalu lintas (*network density*, disimbolkan sebagai K_t). Persamaan yang digunakan untuk menggambar DFM pada sebuah jaringan yang memiliki jalur (*lane*) sebanyak z (Wahaballa, Hemdan, & Kurauchi, 2018; Yan, Tian, & Shi, 2015)

$$F_t = \frac{\sum_{i \in z} f_{i,t} l_i}{\sum_{i \in z} l_i} \quad (7.8)$$

$$K_t = \frac{\sum_{i \in z} k_{i,t} l_i}{\sum_{i \in z} l_i}. \quad (7.9)$$

Beberapa variabel yang digunakan dalam perhitungan aliran dan densitas kendaraan, yaitu $f_{i,t}$ dan $k_{i,t}$ sebagai aliran kendaraan dan densitas kendaraan dalam jalur ke- i pada waktu ke- t , panjang jalur ke- i oleh l_i , dan z menunjukkan jumlah jalur yang ada dalam jaringan. Kondisi lalu lintas

yang digambarkan pada grafik DFM dapat dibagi menjadi 4 wilayah (Yan, Tian, & Shi, 2015). Pada Gambar 7.6, 4 wilayah ini disimbolkan sebagai L_1 , L_2 , L_3 , dan L_4 .



Gambar 7.6 Grafik 4 wilayah DFM

Wilayah L_1 menunjukkan lalu lintas yang ada di kondisi sebelum saturasi, kondisi ini terjadi saat jaringan lalu lintas baru mulai diisi oleh kendaraan. Pada wilayah L_2 lalu lintas sudah masuk ke kondisi tersaturasi, yang berarti banyak jalur di jaringan lalu lintas yang mulai penuh namun masih ada dalam batas jumlah kendaraan yang dapat ditangani oleh jaringan. Pada wilayah L_2 juga terdapat nilai puncak aliran kendaraan (F_{maks}) yang mampu diberikan oleh jaringan lalu lintas. Ketika permintaan lalu lintas (*traffic demand*) (jumlah kendaraan yang masuk ke jaringan) terus meningkat akan terdapat beberapa jalur di jaringan lalu lintas yang penuh dan tidak mampu lagi menampung kendaraan yang akan masuk. Kondisi ini dilanjutkan dengan kendaraan yang mulai menumpuk dan kecepatan kendaraan menjadi menurun sehingga jumlah kendaraan yang keluar dari jaringan lalu lintas menurun. Serangkaian kejadian penambahan kendaraan ini merupakan kondisi yang terjadi di wilayah L_3 .

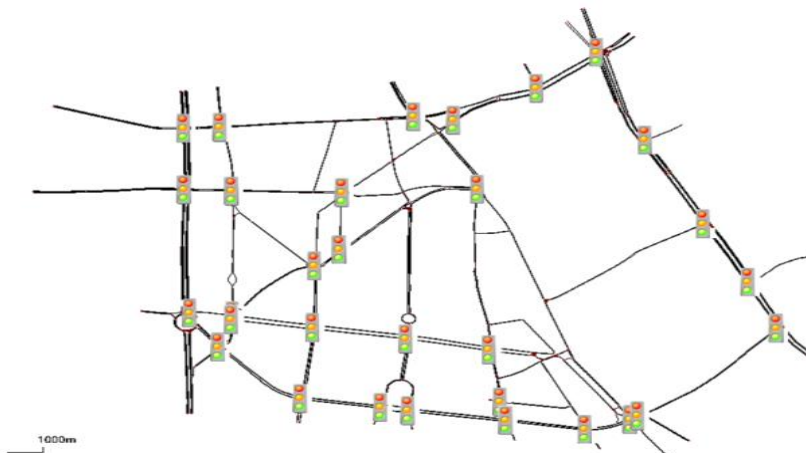
Gambar 7.6 menunjukkan jika permintaan lalu lintas terus meningkat maka titik operasi pada grafik DFM akan semakin menuju titik operasi di wilayah L_3 , dan L_4 , hal ini disebabkan oleh banyaknya kendaraan yang terakumulasi akibat jumlah kendaraan keluar yang menurun namun jumlah kendaraan masuk tidak berkurang. Kondisi ini merupakan keadaan lalu lintas yang ditunjukkan oleh wilayah L_4 , yaitu saat jaringan lalu lintas mengalami keadaan macet total (*gridlock*), pada keadaan ini banyak persimpangan yang sudah terkunci (tidak ada arah pergerakan yang tersedia) sehingga pengontrol

lalu lintas berjenis apapun tidak dapat berbuat banyak. Kinerja jaringan lalu lintas dapat diperbaiki dengan memperlebar wilayah L_2 pada grafik DFM ($n_1 - n_2$ menjadi $n_1' - n_2'$) sehingga nilai puncak aliran keluar kendaraan dari jaringan lalu lintas meningkat. Wilayah L_2 dapat diperlebar dengan meningkatkan gradien garis pada wilayah L_1 (meningkatkan kecepatan rata-rata kendaraan) serta merancang pengontrol lalu lintas yang mampu menunda kondisi lalu lintas menuju wilayah L_3 .

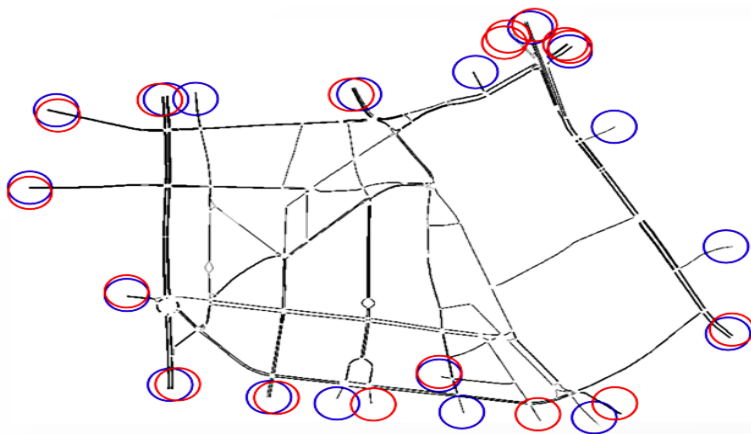
7.5 Jaringan Jalan

Perancangan model jaringan lalu lintas di simulator SUMO dimulai dengan melakukan impor jaringan yang sebelumnya telah dirancang di simulator VISSIM. Proses impor jaringan dapat dilakukan dengan menggunakan netconvert yang disediakan oleh SUMO. Netconvert akan menerima file berekstensi .inpx dan menghasilkan file berekstensi .net.xml. Namun file jaringan yang diperoleh dari perlengkapan netconvert belum dapat langsung digunakan, masih terdapat bug dan informasi yang hilang seperti informasi koneksi antar-jalan di persimpangan serta lampu lalu lintas yang hilang. Informasi jaringan yang hilang ini diperiksa dan ditambahkan secara manual melalui perlengkapan netedit.

Jaringan lalu lintas yang dirancang memiliki 18 jalur masuk ke jaringan dan 17 jalur keluar dari jaringan pada Gambar 7.7a (Fuad dkk., 2022). Simulasi yang dijalankan di SUMO bersifat mikroskopik yang berarti tiap karakteristik kendaraan akan disimulasikan secara individual. Setiap kendaraan yang disimulasikan di SUMO diatur untuk mengikuti model perilaku pengemudi (Wiedemann, 1974). Lokasi jalur-jalur ini ditandai dengan lingkaran biru (jalur masuk) dan merah (jalur keluar) diperlihatkan pada Gambar 7.7b.



Gambar 7.7a Tampilan model jaringan dengan 31 persimpangan di Eclipse SUMO

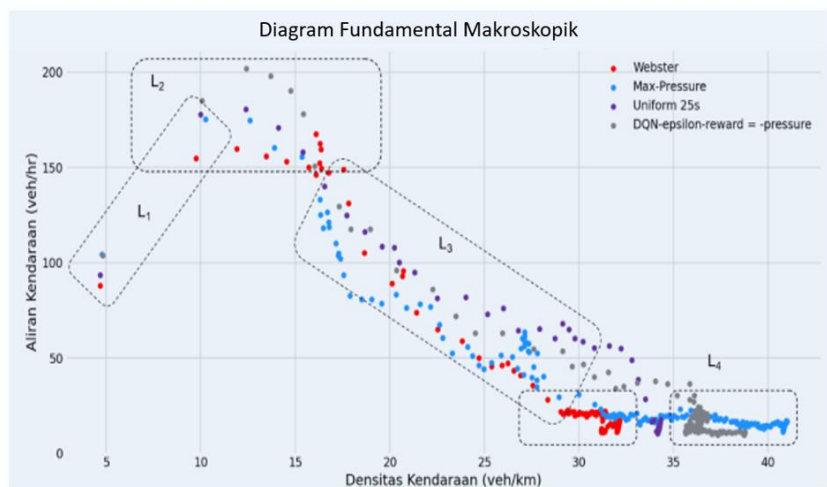


Gambar 7.7b Jalur masuk dan jalur keluar kendaraan dari jaringan

7.6 Kontrol Lalu Lintas oleh Algoritme Pembelajaran Penguatan

Setelah analisis konvergensi menunjukkan bahwa nilai aksi setiap keadaan telah konvergen, selanjutnya dilakukan analisis performa kontrol lalu lintas menggunakan DFM yang menunjukkan hubungan antara aliran kendaraan terhadap densitas kendaraan dalam sebuah jaringan. Algoritme pembelajaran penguatan DQN dipasangkan dengan metode pemilihan aksi berupa eksplorasi serakah- ϵ dengan hadiah yang diberikan kepada agen pembelajaran penguatan di setiap persimpangan adalah tekanan total persimpangan.

Algoritme kontrol lalu lintas ini kemudian diimplementasikan pada model lalu lintas DKI Jakarta yang memberikan hasil-hasil grafik DFM yang telah dipublikasikan (Fuad dkk., 2022) sebagai berikut.

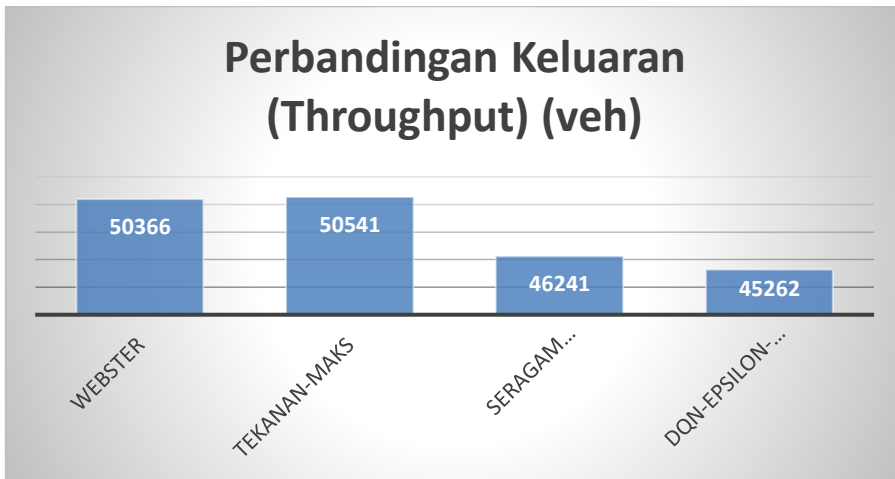


Gambar 7.8 Perbandingan DFM DQN-epsilon terhadap algoritme klasik

Tabel 7.1 Perbandingan properti DFM DQN-epsilon terhadap algoritme klasik

Algoritme Kontrol	Puncak Aliran (veh/hr)	Densitas Maksimal (veh/km)
Webster	168	32
Tekanan Maks	175	41
Seragam (<i>Uniform</i>)	180	34
DQN-epsilon	202	38

Gambar 7.8 dan Tabel 7.1. menunjukkan bahwa algoritme pembelajaran penguatan yang dirancang mampu memperoleh puncak aliran yang lebih tinggi (202 veh/hr) dibanding algoritme kontrol klasik dan konvensional yang digunakan sebagai pembanding, yaitu Webster (168 veh/hr), Tekanan maks variasi $N = 1$ (175 veh/km) dan Seragam (*Uniform*) (180 veh/hr). Namun jika ditinjau dari segi persebaran densitas kendaraan, algoritme pembelajaran penguatan yang dirancang masih belum mampu mengurangi kemacetan. Berdasarkan grafik DFM terlihat bahwa pola densitas kendaraan masih terus bertambah ke kanan setelah aliran kendaraan mencapai titik terendah yang menunjukkan bahwa DFM dari algoritme kontrol ini telah mencapai wilayah L_4 . DFM yang berada pada wilayah L_4 menunjukkan bahwa kondisi lalu lintas yang disimulasikan telah mencapai kondisi macet total (*gridlock*). Selain analisis melalui grafik DFM dilakukan analisis melalui jumlah keluaran (*throughput*) kendaraan sebagai berikut.



Gambar 7.9 Perbandingan keluaran DQN-epsilon terhadap kontrol klasik

Gambar 7.9 menunjukkan bahwa algoritme kontrol DQN yang dirancang memiliki nilai keluaran yang lebih kecil dibanding algoritme kontrol klasik yang digunakan sebagai pembanding. Hasil ini menunjukkan bahwa walaupun puncak aliran yang dihasilkan oleh algoritme kontrol DQN lebih tinggi daripada puncak aliran algoritme kontrol klasik, namun aliran tinggi ini tidak bertahan lama. Kondisi ini menyebabkan kendaraan terakumulasi dalam jaringan sehingga densitas kendaraan dalam jaringan ikut bertambah seiring waktu simulasi berjalan. Untuk memperoleh performa algoritme kontrol lalu lintas yang lebih baik, metode pemilihan aksi eksplorasi serakah- ϵ diganti menggunakan eksplorasi Boltzmann.

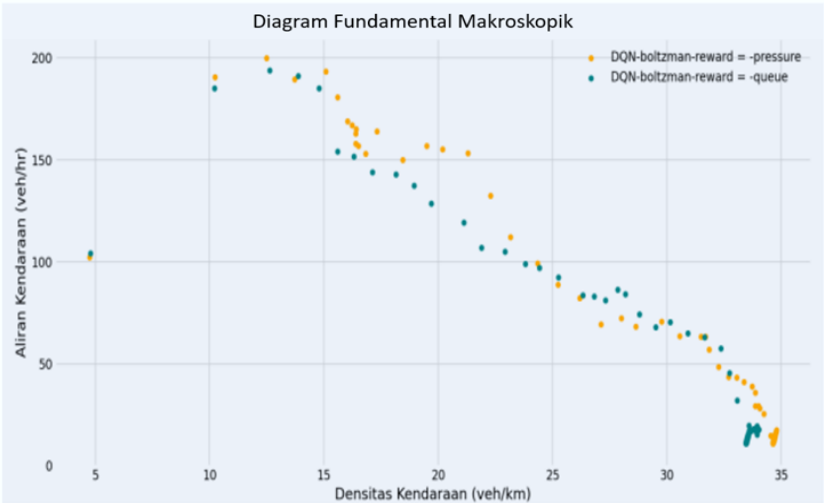
Untuk menyederhanakan analisis kondisi yang terjadi, ditinjau kembali grafik DFM saat hadiah yang diberikan ke agen DQN sepenuhnya tekanan (*pressure*) dan sepenuhnya panjang antrean (*queue length*).

$$r_i = -(w_\alpha \times P_t + (1 - w_\alpha) \times qu_t) \quad (7.10a)$$

$$w_\alpha = \begin{cases} 1; \text{tekanan} \\ 0; \text{panjang antrean} \end{cases} \quad (7.10b)$$

Hadiah pada persamaan (7.10a) dengan bobot w_α (7.10b) dipilih sesuai peralihan mode hadiah yang ditetapkan. Persamaan (7.10a) dan (7.10b) merupakan sistem beralih sebagai kelas dari sistem hibrida. Tabel 7.2. menunjukkan agen DQN-tekanan menghasilkan puncak aliran yang lebih

tinggi dibanding agen DQN-panjang antrean, namun nilai ini juga disertai dengan densitas kendaraan maksimal yang lebih tinggi. Pada Gambar 7.10. dapat dilihat bahwa pada wilayah 23 veh/km hingga 27 veh/km agen DQN-tekanan gagal menjaga kecenderungan penurunan densitas. Secara lebih rinci kondisi kecenderungan penurunan densitas yang diharapkan ditunjukkan oleh panah hitam pada Gambar 7.11.

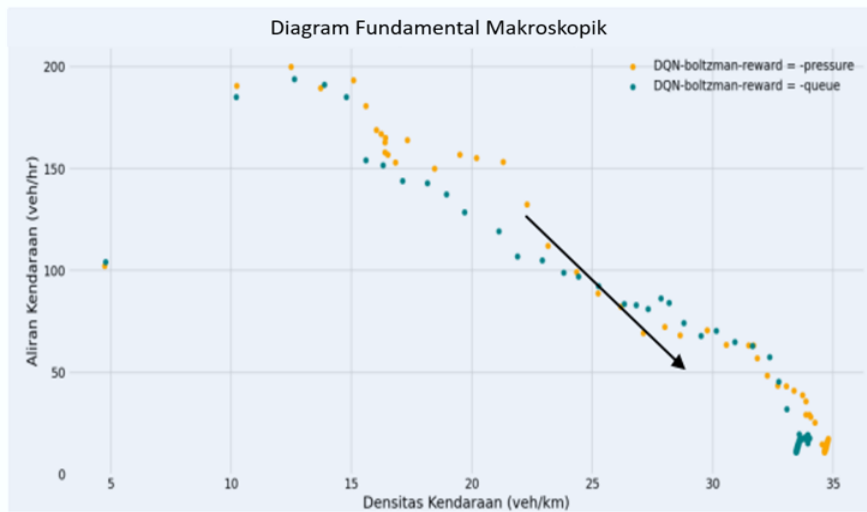


Gambar 7.10 Perbandingan DQN-panjang antrean dan DQN-tekanan

Tabel 7.2 Perbandingan properti DFM DQN-panjang antrean dan DQN-tekanan

Algoritme Kontrol	Puncak (veh/hr)	Aliran	Densitas (veh/km)	Maksimal
DQN-panjang antrean (<i>queue</i>)	194		34	
DQN-tekanan (<i>pressure</i>)	200		35	

Dari kecenderungan penurunan densitas yang terjadi di DFM Gambar 7.11 dapat disimpulkan bahwa pada wilayah densitas 23 veh/km hingga 27 veh/km terjadi pertukaran performa antara agen DQN-tekanan dan DQN-panjang antrean. Diperlukan sebuah agen DQN yang mampu melakukan pertukaran antara hadiah tekanan (*pressure*) dan panjang antrean (*queue*) pada wilayah pertukaran performa ini untuk menghasilkan performa terbaik dari setiap kondisi. Hasil perbaikan hadiah ini berhasil dikembangkan pada referensi (Fuad dkk., 2022).



Gambar 7.11 Kecenderungan penurunan densitas yang diharapkan dari algoritme DQN-panjang antrean dan DQN-tekanan

8. PENUTUP

Peran sistem dan kontrol hibrida dalam perkembangan teknologi rekayasa dari awal hingga era saat ini telah dibahas dalam buku ini. Presentasi dimulai dengan menelusuri kembali kemunculan pertama sistem hibrida. Sungguh mengejutkan bahwa menelusuri kembali perangkat jam air yang dikenal sebagai karya para insinyur pertama sekitar dua ribu dua ratus tahun yang lalu melalui pemikiran logis menghasilkan sistem peralihan sebagai kelas sistem hibrida. Selanjutnya teori dasar sistem hibrida dijelaskan dengan menggunakan model matematika yang dikenal dengan sistem impulsif linier. Beberapa contoh sistem rekayasa yang sering ditemui dalam aktivitas sehari-hari dipaparkan pada bagian sendiri untuk menunjukkan pentingnya peran sistem hibrida.

Pemaparan dilanjutkan dengan menampilkan pengembangan algoritme optimisasi metaheuristik yang memerlukan pengontrolan strategi eksplorasi dan eksploitasi untuk mencapai solusi optimal atau mendekati optimal. Karakteristik peralihan antara eksplorasi dan eksploitasi didapati pada sebagian besar algoritme metaheuristik. Namun karakteristik peralihan yang tajam terjadi pada algoritme lebah tanpa sengat. Fenomena ini menunjukkan bahwa makhluk hidup yang berkelompok mampu mempertahankan evolusinya dengan menggunakan strategi sistem hibrida.

Penerapan sistem hibrida dengan model matematika persamaan diferensial impulsif diberikan pada pembahasan sistem kontrol referensi hibrida. Pengontrol ini menggunakan strategi memanipulasi sinyal referensi untuk membentuk sistem kontrol dengan dua derajat kebebasan yang dapat mencapai kinerja kestabilan dan pelacakan sinyal referensi secara bersamaan dalam satu sistem umpan balik negatif. Penurunan strategi kontrol referensi hibrida dibahas secara singkat tanpa mengabaikan detailnya. Strategi kontrol referensi hibrida menggunakan sistem cerdas logika fuzzy juga dibahas sebagai kelanjutan dari strategi yang diturunkan secara analitis. Karena keterbatasan halaman, penerapan sistem cerdas dengan metode pengelompokan dan *adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)* hanya ditampilkan dalam informasi referensi bagi pembaca yang berminat. Bagian ini ditutup dengan menampilkan purwarupa sistem kontrol referensi hibrida dengan logika fuzzy dalam bentuk foto pameran dan poster peralatan.

Penerapan sistem hibrida pada algoritme pembelajaran penguatan *Deep Q-Network (DQN)* disajikan pada bagian selanjutnya. Pengembangan DQN dalam sistem kontrol lalu lintas untuk mengatasi masalah kemacetan pada jaringan jalan perkotaan dapat dirancang dengan menggunakan fungsi hadiah yang beralih dari penekanan pada tekanan ke panjang antrean atau sebaliknya. Evaluasi kinerja sistem kontrol lalu lintas dengan DQN menggunakan diagram fundamental makroskopik (DFM) menunjukkan kemampuan rancangan ini dalam menangani kemacetan lalu lintas dengan lebih baik.

Sistem dan kontrol hibrida telah berperan sejak awal diciptakannya perangkat simulasi kehidupan hingga rekayasa modern yang ditunjukkan dengan adanya sinergi dengan kemajuan teori dan teknologi pada kurun waktu tersebut. Tantangan besar masih menghadang di masa depan, seperti mengatasi peningkatan kompleksitas sistem, mengamankan infrastruktur yang terhubung secara digital, dan memaksimalkan efisiensi sumber daya. Perjalanan sistem dan kontrol hibrida untuk berperan dalam kemajuan teknologi bagi umat manusia masih memerlukan kerja keras, kolaborasi, dan inovasi untuk mencapai hasil yang luar biasa.

Terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dan berkontribusi pada pengembangan sistem dan kontrol hibrida yang dirangkum dalam buku ini, termasuk mahasiswa, rekan peneliti, teman, dan keluarga.

Semoga buku ini memberikan wawasan berharga dan menjadi sumber inspirasi bagi pembaca untuk terus mengeksplorasi dunia masa depan yang menarik mengenai peran sistem dan kontrol hibrida dalam teknologi rekayasa. Selamat menempuh perjalanan hidup menuju masa depan cerah dan berkelanjutan.

9. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur atas kasih karunia Tuhan Yesus Kristus, dan kasih Allah yang senantiasa menyertai sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Terima kasih Tuhan Yesus atas penghiburan dan kekuatan yang Engkau berikan dalam masa-masa kesulitan dan awan kelabu. Engkau adalah penghibur yang setia dan selalu ada mendampingi perjalanan hidup selama ini hingga berkat yang Engkau berikan untuk menjalani karier akademik sebagai Guru Besar di ITB.

Terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada Pimpinan dan Majelis Wali Amanat ITB, Rektor dan Jajarannya, Pimpinan dan Majelis Senat ITB, Pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB serta Dekanat Fakultas Teknologi Industri ITB, Prof. Brian Yulianto, Prof. Ari Widyanti, dan Prof. Yogi Wibisono Budhi, beserta jajarannya atas dukungan yang diberikan dalam proses pengusulan jabatan Guru Besar.

Terima kasih kepada Ir. Rachmad Mohamad, n.i. (alm.) sebagai wali akademik selama menempuh pendidikan sarjana Teknik Fisika FTI ITB, Bapak Kusmayanto Kadiman, Menteri Negara Riset dan Teknologi dalam Kabinet Indonesia Bersatu dan Ir. Al. Praptowidodo, M.Sc. (alm.) sebagai pembimbing tugas akhir, dan Prof. Arifin Wardiman (alm.) Ketua Laboratorium Instrumentasi dan Kontrol (LINK) yang telah memberikan pembinaan untuk menjadi asisten dosen kuliah Kontrol Otomatik. Para guru ini telah mendorong saya untuk bergabung menjadi dosen di Teknik Fisika FTI ITB setelah lulus menjadi Sarjana Teknik Fisika. Ungkapan terima kasih kepada Prof. Darrell Williamson sebagai promotor doktor di Australian National University, Australia yang telah banyak memberikan pelajaran dalam melakukan penelitian.

Terima kasih kepada Prof. Harijono A. Tjokronegoro yang telah memberikan bimbingan untuk menjadi asisten praktikum Kursus Intensif Sistem Kontrol Berbasis Komputer (KISKBK) pada modul pelatihan Kontrol Adaptif, Dr. Bambang S.P. Abednego dan Dr. Nyoman Bangsing (alm.) yang sering membagikan pengalaman kuliah di luar negeri yang memberikan motivasi untuk belajar lanjut. Kemudian, Prof. Yudi Samyudia dan Dr. Sonny Yuliar atas kebersamaan dalam memulai kehidupan awal sebagai asisten di LINK.

Ucapan terima kasih kepada Dr. Farida I. Muchtadi, Dr. Endang Juliastuti, Dr. M. Rohmanuddin, Dr. Sutanto Hadisupadmo, Dr. Agus Samsi, Dr. Edi Leksono, Dr. Aman Mostavan, Ir. Soelardjo Kertoatmojo (alm.), Ir. Hadiwaratama, MSEE (alm.), Prof. Soegijanto (alm.), Prof. Benjamin Soenarko, Prof. Amoranto Trisnobudi (alm.), dan Prof. Andrianto Handojo (alm.) atas bimbingan yang diberikan pada saat awal memasuki dunia akademik di Teknik Fisika FTI ITB.

Terima kasih juga kepada Dr. I Gde Nyoman (Komang) Merthayasa, F.X. Nugroho Soelami, Ph.D., Ir. R. Triyogo, MDESSC (Illum.), Ir. Wisnu Hendrajit M.Sc. (alm.), Ahmad Nuruddin, Ph.D., Dr. Suyatman, dan Ida Bagus Ardhana Putra, Ph.D. (alm.) untuk semua perhatian, keramahan dan dukungan saat memulai karier di Teknik Fisika FTI ITB sekembali dari tugas belajar doktor di Australia. Ucapan terima kasih kepada Prof. Hermawan Kresno Dipojono, Prof. Yul Yunazwin Nazaruddin, Prof. Bambang Sunendar, Prof. Deddy Kurniadi, dan Prof. Suprijanto para Guru Besar di Teknik Fisika FTI ITB yang mendukung dan mendorong dalam mencapai jabatan Guru Besar. Terima kasih kepada dosen setelah LINK (1990), yang menjadi Kelompok Keahlian (KK) Instrumentasi dan Kontrol (KKIK (2006)), Dr.-Ing. Parsaulian I. Siregar, Augie Widyotriatmo, Ph.D., Dr. Vebi Nadhira, Ayu Gareta Risangtuni, S.T, M.T., Narendra Kurnia Putra, Ph.D. dan Naila Zahra, S.T., M.T. atas kebersamaan dalam KK.

Terima kasih kepada dosen-dosen di Teknik Fisika dari KK Teknik Fisika, KK Fisika Bangunan, dan KK Material Fungsional Maju: Dr. Eko M. Budi, Estiyanti Ekawati, Ph.D., R. Sugeng Joko Sarwono, Ph.D., Dr. Rahmat Romadhon, Ashari B. Nugraha, S.T., M.T., Faqihza Mukhlis, Ph.D., Dr. Irsyad N. Haq, Dr.-Ing. Justin Pradipta, Anugrah S. Sudarsono, Ph.D., Iwan Prasetyo, Ph.D., Miranti I. Mandasari, Ph.D., Dr. Rizki A. Mangkuto, Dr. Ni Putu A. Nitidara, Adhitya G. Saputro, Ph.D., Dr. Damar R. Adhika, Fadjar Fathurahman, Ph.D., Ganes Shukri, Ph.D., M. Kemal Agusta, Ph.D., M. Haris Mahyuddin, Ph.D., Dr. Eng. Muhammad Iqbal, dan Dr. Eng. Nugraha.

Ucapan terima kasih kepada rekan peneliti: Herman Y. Sutarto, Ph.D., Prof. Diah Chaerani, Prof. Salmah, Prof. Mauridhi Hery Purnomo, Prof. Kalamullah Ramli, Dr. Eng. Yosi A. Hidayat, Arjon Turnip, Ph.D., A. Tua Tamba, Ph.D., dan Assoc. Prof. Ling Keck Voon (NTU, Singapura) yang telah menumbuhkan jejaring dan arah-arrah penelitian baru.

Terima kasih kepada mahasiswa di S2 Instrumentasi dan Kontrol dan S2 Teknik Fisika yang telah lulus dan berperan dalam pengembangan penelitian yang dilaksanakan di Laboratorium Kecerdasan Artifisial, Kontrol dan Otomasi: Dr. Basuki Rahmat (UPN “Veteran” Jatim), Dr. Azka M. Burohman, Dr. Selvi Lukman, kandidat doktor: Lucas E. Suryana, M.T., Steven Bandong, M.T., Reza F. Iskandar, M.T., M. Rizalul Wahid, M.T., Helmy Rahadian, M.T., Adiyana Putri, M.T., Muhammad F. Fathurrahman, M.T. Sapaan spesial dan kebanggaan bagi Prof. Andri Dian Nugraha mahasiswa bimbingan S1 di Teknik Geofisika yang telah mencapai Guru Besar ITB di usia yang sangat muda.

Terima kasih dan penghargaan kepada tim Pusat Tanpa Awak Prof. Muljowidodo Kartidjo, Prof. Bambang Riyanto Trilaksono, Dr. Agus Budiyo, Dr. Widyawardana Adiprawita, Dr. Ing. M. Agoes Moelyadi, dan Dr. Rais Zain yang telah membuka wawasan penelitian pada bidang wahana tak berawak. Keterlibatan pada pusat ini memberikan gairah dan dorongan yang besar untuk produktif menulis artikel ilmiah dan melakukan kerjasama dalam dan luar negeri.

Terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada pemberi rekomendasi Guru Besar pada pengajuan fase pertama: Prof. Sri Widiyantoro, Prof. Janson Naiborhu, Prof. Tjandra Setiadi, Prof. Harijono A. Tjokronegoro, Prof. Salmah (UGM), Prof. Mauridhi Hery Purnomo (ITS), dan Prof. Fitri Yuli Zulkifli (UI, Ketua IEEE Indonesia Section) dan pemberi rekomendasi Guru Besar pada fase kedua: Prof. Deddy Kurniadi, Prof. Sri Widiyantoro, Prof. Salmah (UGM), Prof. Sidharta Gautama (Ghent University, Belgia), dan Prof. Ivana (Cavar) Semanjski (Ghent University, Belgia).

Terima kasih khusus kepada Prof. Johnner Sitompul (FMIPA ITB) yang selalu memompa semangat untuk maju terus dalam mencapai Guru Besar dan Prof. Carmadi Machbub (STEI ITB) yang memberikan kesempatan untuk melengkapi administrasi sebagai promotor doktor di ITB.

Terima kasih kepada dosen dan peneliti di NCSTT ITB: Ir. Sigit Puji Santosa, MSME., Sc.D., Dr. Bentang Arief Budiman, dan tim; Djarot Widagdo, Ph.D. dan tim di Pusat Unggulan Iptek Teknologi Pertahanan dan Keamanan (PUSTEKHAN); Ayu Purwarianti, Ph.D. dan tim di PUI-PT (Pusat Unggulan Iptek - Perguruan Tinggi) AI-VLB (*Artificial Intelligence on Vision, NLP & Big Data Analytics*) yang telah memberikan kesempatan untuk mengembangkan

dan mengisi kontribusi pengetahuan sesuai dengan cakupan pusat. Ucapan terima kasih khusus kepada Prof. Ni Ketut Sari (UPN “Veteran” Jatim) atas kerjasama yang berjalan selama menunggu proses pengajuan Guru Besar.

Terima kasih kepada keluarga terkasih, istri tercinta dr. Maria E. Prasetyo, M.T., dan ananda Danika L. Joelianto, S.Ds. dan Reinara S. Joelianto untuk segala kasih sayang, dukungan dan pengertiannya akan kesibukan suami dan ayahnya, serta kerelaannya kehilangan waktu kebersamaan karena terambil untuk pekerjaan pemenuhan keperluan mencapai Guru Besar. Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada orang tua terkasih Yohanes Soegijanto (alm.) dan Jajoek Ekowati serta mertua terkasih Gunarto Suryo Prasetyo dan Tetty Sugiarni yang selalu memberikan dorongan untuk terus maju. Terima kasih yang teramat dalam untuk keluarga dr. Tony Kosan, Sp.T.H.T. (alm.) dan Jien Otto (alm.) yang telah memberikan beasiswa selama menempuh pendidikan sarjana di ITB. Beasiswa ini telah memberikan langkah awal untuk memulai perjalanan ribuan langkah mencapai doktor di Australia dan Guru Besar di ITB.

Ucapan terima kasih juga kepada tenaga kependidikan dan staf, seperti Rina Kania, Gina Safitri, Dadan Sujana, Shafira Nurhasanah, An Nur Aini Muzasyaroh, Indriati Arisa, dan Lina Marlina yang telah membantu dalam penyiapan dan pemrosesan berkas DUPAK.

Akhir kata, saya ucapkan terima kasih sebesar-besarnya pada segala pihak yang telah berkontribusi langsung maupun tidak langsung tetapi belum disebutkan dalam buku ini. Meskipun tidak tersebut, kontribusi yang diberikan adalah sangat berarti bagi saya.

DAFTAR PUSTAKA

- Alur, R., Courcoubetis, C., Henzinger, T., & Ho, P. H. (1993). Hybrid automata: an algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems. In *Hybrid Systems I*, LNCS 736. Springer-Verlag, 209-229.
- Alur, R., Courcoubetis, C., Halbwachs, N., Henzinger, T. A., Ho, P. H., Nicollin, X., ... & Yovine, S. (1995). The algorithmic analysis of hybrid systems. *Theoretical computer science*, 138(1), 3-34.
- Ambühl, L., Menendez, M., & González, M. C. (2023). Understanding congestion propagation by combining percolation theory with the macroscopic fundamental diagram. *Communications Physics*, 6(1), 26.
- Anderson, B. D. & Moore, J. B. (1971). *Linear optimal control*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Anderson, B. D., & Moore, J. B. (2007). *Optimal control: linear quadratic methods*. Courier Corporation.
- Andersson, M. (1993). *OmSim and Omola Tutorial and User's Manual: Version 3.4*; Dept. of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Antsaklis, P., Kohn, W., Nerode, A., & Sastry, S. (Eds.). (1995). *Hybrid Systems II* (Vol. 999). New York: Springer.
- Astrom, K. J., & Hagglund, T. (1995). *PID controllers, theory, design and tuning*. Research Triangle Park: 2nd Ed. Instrument Society of America.
- Bainov, D., & Simeonov, P. (1989). *Systems with impulse effect: stability, theory, and applications*. Chichester-West Sussex: Ellis Horwood Limited.
- Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). SUMO-simulation of urban mobility: an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind.
- Biesmeijer, J. C., & Tóth, E. (1998). Individual foraging, activity level and longevity in the stingless bee *Melipona beecheii* in Costa Rica (Hymenoptera, Apidae, Meliponinae). *Insectes sociaux*, 45, 427-443.
- Boichuk, A., Langerová, M., & Škoríková, J. (2010). Solutions of linear impulsive differential systems bounded on the entire real axis. *Advances in Difference Equations*, 2010, 1-10.
- Boukerche, A., Zhong, D., & Sun, P. (2021). A novel reinforcement learning-based cooperative traffic signal system through max-pressure control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(2), 1187-1198.

- Branicky, M. S. (1998). Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4), 475-482.
- Branicky, M. S., Borkar, V. S., & Mitter, S. K. (1998). A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory. *IEEE Transactions On Automatic Control*, 43(1), 31-45.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2018, February 5). Ctesibius Of Alexandria. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/biography/Ctesibius-of-Alexandria>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2020, April 23). Zeno of Elea. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/biography/Zeno-of-Elea>
- Bunch, B., Bunch, B. H., & Hellemans, A. (2004). *The history of science and technology: a browser's guide to the great discoveries, inventions, and the people who made them, from the dawn of time to today*. Houghton Mifflin Harcourt. USA.
- Carter, T. E., & Brient, J. (1995). Linearized impulsive rendezvous problem. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 86, 553-584.
- Coddington, E.A., & Levinson, N. (1955). *Theory of Ordinary Differential Equations*. New York: McGraw-Hill.
- Cotterell, B., Dickson, F. P., & Kamminga, J. (1986). Ancient Egyptian water-clocks: A reappraisal. *Journal of Archaeological Science*, 13(1), 31-50.
- Dorato, P., Cerone, V., & Abdallah, C. (1994). *Linear-quadratic control: an introduction*. Simon & Schuster, Inc.
- Dorin, A. (2012). We are the creators of artificial life – both now and through the ages. Published: September 11, 2012 11.26am WIB. <https://theconversation.com/we-are-the-creators-of-artificial-life-both-now-and-through-the-ages-8958>
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to evolutionary computing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Eom, M., & Kim, B. I. (2020). The traffic signal control problem for intersections: a review. *European Transport Research Review*, 12, 1-20.
- Fallside, F. (1977). *Control system design by pole-zero assignment: based on papers presented at a working party at Cambridge University, September, 1974*. Academic Press.
- Fellendorf, M. (1994, October). VISSIM: A microscopic simulation tool to evaluate actuated signal control including bus priority. In *64th Institute of Transportation Engineers Annual Meeting (Vol. 32, pp. 1-9)*. Springer.

- Fewell, J. H., & Winston, M. L. (1992). Colony state and regulation of pollen foraging in the honey bee, *Apis mellifera* L. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 30, 387-393.
- Fuad, M. R. T., Fernandez, E. O., Mukhlis, F., Putri, A., Sutarto, H. Y., Hidayat, Y. A., & Joelianto, E. (2022). Adaptive Deep Q-Network Algorithm with Exponential Reward Mechanism for Traffic Control in Urban Intersection Networks. *Sustainability*, 14(21), 14590.
- Francis, B. A., & Wonham, W. M. (1975). The internal model principle for linear multivariable regulators. *Applied Mathematics and Optimization*, 2(2), 170-194.
- Francis, B. A., & Wonham, W. M. (1976). The internal model principle of control theory. *Automatica*, 12(5), 457-465.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (1986). *Feedback control of dynamic systems*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Pub. Co.
- Gayah, V. V., Gao, X. S., & Nagle, A. S. (2014). On the impacts of locally adaptive signal control on urban network stability and the macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 255-268.
- Genders, W., & Razavi, S. (2019). An open-source framework for adaptive traffic signal control. *arXiv preprint arXiv:1909.00395*.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759-770.
- Geroliminis, N., & Sun, J. (2011). Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(3), 605-617.
- Godbole, D. N. (1994). *Hierarchical hybrid control of automated highway systems*. University of California, Berkeley.
- Green, M., & Limebeer, D. J. (1994). *Robust linear control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Halanay, A., & Wexler, D. (1971). *The qualitative theory of systems with impulse*, Bucuresti ("Mir", Moscow, 1971): Editura Academiei Republicii Soc. Romania, 1968.
- Hassan, S. A., Xuan, T. H., & Mashros, N. (2017). Characteristics of vehicle headway during rainfall at night in Pontian, Johor. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 29(1), 59-74.
- Haq, M. T., Farid, A., & Ksaibati, K. (2022). Estimating passing sight distances for overtaking truck platoons–Calibration and validation using VISSIM. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(2), 255-267.

- Heemels, W. P. M. H., De Schutter, B., Lunze, J., & Lazar, M. (2010). Stability analysis and controller synthesis for hybrid dynamical systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1930), 4937-4960.
- Henzinger, T. A., Horowitz, B., Majumdar, R., & Wong-Toi, H. (2000, March). Beyond HYTECH: Hybrid systems analysis using interval numerical methods. In *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control* (pp. 130-144). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Heymann, M., Lin, F., Meyer, G., & Resmerita, S. (2005). Analysis of Zeno behaviors in a class of hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(3), 376-383.
- Ho, P. H. (1995). Automatic analysis of hybrid systems. Ph.D. Dissertation. Cornell University.
- Hrncir, M., & Maia-Silva, C. (2012). On the diversity of foraging-related traits in stingless bees. In *Pot-Honey: A legacy of stingless bees* (pp. 201-215). New York, NY: Springer New York.
- Hrncir, M., Jarau, S., & Barth, F. G. (2016). Stingless bees (Meliponini): senses and behavior. *Journal of Comparative Physiology A*, 202, 597-601.
- Hrncir, M., Schmidt, V. M., Schorkopf, D. L. P., Jarau, S., Zucchi, R., & Barth, F. G. (2006). Vibrating the food receivers: a direct way of signal transmission in stingless bees (*Melipona seminigra*). *Journal of Comparative Physiology A*, 192, 879-887.
- Hsu, C. S. (2013). Cell-to-cell mapping: a method of global analysis for nonlinear systems (Vol. 64). New York: Springer Science & Business Media.
- Hwang, Z. H., Yan, H. S., & Lin, T. Y. (2021). Historical development of water-powered mechanical clocks. *Mechanical Sciences*, 12(1), 203-219.
- Inoue, T., Salmah, S., Abbas, I., & Yusuf, E. (1985). Foraging behavior of individual workers and foraging dynamics of colonies of three Sumatran stingless bees. *Researches on Population Ecology*, 27, 373-392.
- Jarau, S., Hrncir, M., Ayasse, M., Schulz, C., Francke, W., Zucchi, R., & Barth, F. G. (2004). A stingless bee (*Melipona seminigra*) marks food sources with a pheromone from its claw retractor tendons. *Journal of Chemical Ecology*, 30, 793-804.
- Ji, Y., Daamen, W., Hoogendoorn, S., Hoogendoorn-Lanser, S., & Qian, X. (2010). Investigating the shape of the macroscopic fundamental diagram using simulation data. *Transportation Research Record*, 2161(1), 40-48.

- Jiang, G., & Yang, Q. (2009). Complex dynamics in a linear impulsive system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41(5), 2341-2353.
- Joelianto, E. (2000). Linear hybrid reference control systems. Ph.D. Thesis; The Australian National University, Australia.
- Joelianto, E. (2003, September). Linear impulsive differential equations for hybrid systems modeling. In 2003 European Control Conference (ECC) (pp. 3335-3340). IEEE.
- Joelianto, E. (2011). Robust H^∞ PID Controller Design Via LMI Solution of Dissipative Integral Backstepping with State Feedback Synthesis. In *Robust Control, Theory and Applications*. Andrzej Bartoszewicz (Ed.). IntechOpen, 69-88.
- Joelianto, E. (2014). Finite horizon optimal hybrid reference control for improving transient response of feedback control systems. *International Journal of Systems Science*, 45(9), 1814-1829.
- Joelianto, E., Anura, D. C., & Priyanto, M. (2013). ANFIS-hybrid reference control for improving transient response of controlled systems using PID controller. *International Journal of Artificial Intelligence*, 10(S13), 88-111.
- Joelianto, E., Fathurrahman, M. F., Sutarto, H. Y., Semanjski, I., Putri, A., & Gautama, S. (2022a). Analysis of spatiotemporal data imputation methods for traffic flow data in urban networks. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5), 310.
- Joelianto, E., Nainggolan, A., & Hidayat, Y. A. (2020). Stingless bee algorithm for numerical optimization problems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 16(6), 2063-2081.
- Joelianto, E., & Prakoso, B. (2017). Stingless bee foraging behaviour algorithm for optimisation. *International Journal of Artificial Intelligence*, 15(1), 1-20.
- Joelianto, E., & Sitanggang, P. H. (2009). A subtractive clustering based fuzzy hybrid reference control design for transient response improvement of PID controller. *ITB J. Eng. Sci.*, 41(2), 167-186.
- Joelianto, E., & Sutarto, H. Y. (2009). Controlled switching dynamical systems using linear impulsive differential equations. *Intelligent Unmanned Systems: Theory and Applications*, 227-244.
- Joelianto, E., & Tansri, O. (2007). Fuzzy logic based hybrid reference control for improving transient response performance of PID controller. *ITB Journal A*, 39, 124-145.
- Joelianto, E., Utami, F. P., Sutarto, H. Y., Gautama, S., Semanjski, I., & Fathurrahman, M. F. (2022b). Performance Analysis of Max-Pressure Control System for Traffic

- Network using Macroscopic Fundamental Diagram. *International Journal of Artificial Intelligence*, 20(2), 1-23.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (1997a). Continuous time deadbeat response using discrete event reference control. In *Proc. CONTROL 97*. pp.195-200.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (1997b, December). Discrete event reference control. In *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control* (Vol. 1, pp. 692-697). IEEE.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (1998a). Optimal full state hybrid reference control. In *Mathematical Theory of Networks & Systems* (pp. 941-944). Padova-Italy: Il Poligrafo.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (1998b, December). Observer based hybrid reference control. In *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control* (Cat. No. 98CH36171) (Vol. 4, pp. 4296-4301). IEEE.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (1998c, December). Stability of impulsive dynamical systems. In *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control* (Cat. No. 98CH36171) (Vol. 4, pp. 3717-3722). IEEE.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (2002, February). Controllability of linear impulsive systems. In *Proceedings Information, Decision and Control* (pp. 205-210).
- Joelianto, E., & Williamson, D. (2003, September). Discrete-time stability of hybrid systems modeled by linear impulsive systems. In *2003 European Control Conference (ECC)* (pp. 3311-3316). IEEE.
- Joelianto, E., & Williamson, D. (2009). Transient response improvement of feedback control systems using hybrid reference control. *International Journal of Control*, 82(10), 1955-1970.
- Johansson, K. H., Egerstedt, M., Lygeros, J., & Sastry, S. (1999). On the regularization of Zeno hybrid automata. *Systems & Control Letters*, 38(3), 141-150.
- Johansson, K. H., Lygeros, J., & Sastry, S. (2004). Modeling of hybrid systems. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Theme 6.43: Control Systems, Robotics and Automation.
- Kailath, T. (1980). *Linear systems* (Vol. 156). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization (Vol. 200, pp. 1-10). Technical report-TR06, Erciyes University. Kayseri. Turkey.
- Karaboga, D., & Akay, B. (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214(1), 108-132.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007, June). Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. In *International*

- Fuzzy Systems Association World Congress (pp. 789-798). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Knoop, V. L., Hoogendoorn, S. P., & Van Lint, J. W. C. (2012). Routing strategies based on macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Record*, 2315(1), 1-10.
- Kong, D., Chang, T., Dai, W., Wang, Q., & Sun, H. (2018). An improved artificial bee colony algorithm based on elite group guidance and combined breadth-depth search strategy. *Information Sciences*, 442, 54-71.
- Kouvelas, A., Lioris, J., Fayazi, S. A., & Varaiya, P. (2014). Maximum pressure controller for stabilizing queues in signalized arterial networks. *Transportation Research Record*, 2421(1), 133-141.
- Krausa, K., Hager, F. A., & Kirchner, W. H. (2017). The effect of food profitability on foraging behaviors and vibrational signals in the African stingless bee *Plebeina hildebrandti*. *Insectes Sociaux*, 64, 567-578.
- Kwakernaak, H., & Sivan, R. (1972). *Linear optimal control systems*. New York: Wiley-Interscience.
- Kumaravel, S. D., & Ayyagari, R. (2021). A graph-theoretic approach for optimizing signalized intersections under connected vehicle environment. *Sādhana*, 46(3), 152.
- Lakshmikantham, V., & Simeonov, P. S. (1989). *Theory of impulsive differential equations (Vol. 6)*. World scientific.
- Lakshmikantham, V., & Devi, J. V. (2006). Hybrid systems with time scales and impulses. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 65(11), 2147-2152.
- Lepschy, A. M., Mian, G. A., & Viaro, U. (1992). Feedback control in ancient water and mechanical clocks. *IEEE Transactions on Education*, 35(1), 3-10.
- Lewis, F. L. (1992). *Applied optimal control and estimation*. Prentice Hall PTR.
- Levy, S. (1993). *Artificial life: the quest for a new creation*. Penguin Science Series.
- Lindauer, M. (1967). Recent advances in bee communication and orientation. *Annual Review of Entomology*, 12(1), 439-470.
- Liu, H., & Gayah, V. V. (2023). Total-delay-based Max Pressure: A Max Pressure Algorithm Considering Delay Equity. *Transportation Research Record*, 03611981221147051.
- Lunze, J. (2002). What is a hybrid system?. In *Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems* (pp. 3-14). Springer Berlin Heidelberg.

- Lunze, J., & Lamnabhi-Lagarrigue, F. (Eds.). (2009). *Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications*. Cambridge University Press.
- Lygeros, J. (2004, February). Lecture notes on hybrid systems. In *Notes for an ENSIETA workshop*.
- Mariton, M. (1990). *Jump Linear Systems in Automatic Control*, Marcer Dekker. Inc., New York, NY.
- Mayr, O. (1970). The origins of feedback control. *Scientific American*, 223(4), 110-119.
- Mercader, P., Uwayid, W., & Haddad, J. (2020). Max-pressure traffic controller based on travel times: An experimental analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 110, 275-290.
- McNown, J. S. (1976). When time flowed The Story of the Clepsydra. *La Houille Blanche*, (5), 347-353.
- Michener, C. D. (1974). *The social behavior of the bees: a comparative study*. Harvard University Press.
- Michener, C. D. (2000). *The bees of the world* (Vol. 1). Baltimore and London: JHU press.
- Mills, A. A. (1982). Newton's water clocks and the fluid mechanics of clepsydrae. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 37(1), 35-61.
- Milman, V. D., & Myshkis, A. D. (1960). On the stability of motion in the presence of impulses. *Sibirskii Matematicheskii Zhurnal*, 1(2), 233-237.
- Monga, R., & Mehta, D. (2022, December). SUMO (Simulation of Urban Mobility) and OSM (Open Street Map) Implementation. In *2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)* (pp. 534-538). IEEE.
- Munkres, J.R. (1975). *Topology*. Englewood Cliffs; NJ: Prentice-Hall.
- Nagy, A. M., & Simon, V. (2018). Survey on traffic prediction in smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*, 50, 148-163.
- O'Donnell, S., & Jeanne, R. L. (1992). Lifelong patterns of forager behaviour in a tropical swarm-founding wasp: effects of specialization and activity level on longevity. *Animal Behaviour*, 44(6), 1021-1027.
- Osband, I., Blundell, C., Pritzel, A., & Van Roy, B. (2016). Deep exploration via bootstrapped DQN. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 29.
- Ozer, A. O. (2011). *Exact boundary controllability and feedback stabilization for a multi-layer Rao-Nakra beam*. Iowa State University.

- Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., & Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12), 2043-2067.
- Pavlidis, T. (1966). Stability of a class of discontinuous dynamical systems. *Information and Control*, 9(3), 298-322.
- Pidhayny, D. (1972). The origins of feedback control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 17(2), 283-284.
- Pierce, J. G., & Schumitzky, A. (1976). Optimal impulsive control of compartment models, i: Qualitative aspects. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 18(4), 537-554.
- Powers, W. T. (2016). *Perceptual Control Theory: An Overview of the Third Grand Theory in Psychology—Introductions, Readings, and Resources*. Living Control Systems Publ, 2016.
- Ramadhan, S. A., Joelianto, E., & Sutarto, H. Y. (2019). Simulation of traffic control using Vissim-COM interface. *Internetworking Indonesia Journal*, 11(1), 55-61.
- Ramadhan, S. A., Sutarto, H. Y., Kuswana, G. S., & Joelianto, E. (2020). Application of area traffic control using the max-pressure algorithm. *Transportation Planning and Technology*, 43(8), 783-802.
- Rees, A. (1970). Rees's Clocks Watches and Chronometers (1819-20). David and Charles.
- Rosenbrock, H. H. (1969, November). Design of multivariable control systems using the inverse Nyquist array. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* (Vol. 116, No. 11, pp. 1929-1936). IET Digital Library.
- Rowland, I. D., & Howe, T. N. (Eds.). (2001). *Vitruvius: 'Ten books on architecture'*. Cambridge University Press.
- Saberi, M., & Mahmassani, H. S. (2012). Exploring properties of networkwide flow-density relations in a freeway network. *Transportation Research Record*, 2315(1), 153-163.
- Saranathan, H., & Grant, M. J. (2018). Relaxed autonomously switched hybrid system approach to indirect multiphase aerospace trajectory optimization. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55(3), 611-621.
- Schmidt, V. M., Schorkopf, D. L. P., Hrncir, M., Zucchi, R., & Barth, F. G. (2006). Collective foraging in a stingless bee: dependence on food profitability and sequence of discovery. *Animal Behaviour*, 72(6), 1309-1317.
- Schmidt, V. M., Zucchi, R., & Barth, F. G. (2003). A stingless bee marks the feeding site in addition to the scent path (*Scaptotrigona aff. depilis*). *Apidologie*, 34(3), 237-248.

- Seron, M. M., Braslavsky, J. H., & Goodwin, G. C. (2012). *Fundamental limitations in filtering and control*. Springer Science & Business Media.
- Shamim Akhter, M., Ahsan, N., Quaderi, S. J. S., Al Forhad, M. A., Sumit, S. H., & Rahman, M. R. (2020). A SUMO based simulation framework for intelligent traffic management system. *J. Traffic Logist. Eng*, 8.
- Shinskey, F. (1996). *Process control systems: application, design, and tuning*. McGraw-Hill Co. Inc., New York, NY.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2005). *Principles and practices of automatic process control*. John Wiley & Sons
- Stursberg, O., Kowalewski, S., Hoffmann, I., & Preußig, J. (1997). Comparing timed and hybrid automata as approximations of continuous systems. In *Hybrid Systems IV 4* (pp. 361-377). Springer Berlin Heidelberg.
- Takatsu, H., Itoh, T., & Araki, M. (1998). Future needs for the control theory in industries—report and topics of the control technology survey in Japanese industry. *Journal of Process Control*, 8(5-6), 369-374.
- Tassiulas, L., & Ephremides, A. (1990, December). Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks. In *29th IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 2130-2132). IEEE.
- Varaiya, P. (2013a). The max-pressure controller for arbitrary networks of signalized intersections. In *Advances in Dynamic Network Modeling in Complex Transportation Systems* (pp. 27-66). New York, NY: Springer New York.
- Varaiya, P. (2013b). Max pressure control of a network of signalized intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 177-195.
- Wahaballa, A. M., Hemdan, S., & Kurauchi, F. (2018). Relationship Between Macroscopic Fundamental Diagram Hysteresis and Network-Wide Traffic Conditions. *Transportation Research Procedia*, 34, 235-242.
- Wang, H., Wang, W., Xiao, S., Cui, Z., Xu, M., & Zhou, X. (2020). Improving artificial bee colony algorithm using a new neighborhood selection mechanism. *Information Sciences*, 527, 227-240.
- Webster, F. V. (1958). Traffic signal settings (No. 39). Road Research Lab Tech Papers /UK.
- Wei, H., Chen, C., Zheng, G., Wu, K., Gayah, V., Xu, K., & Li, Z. (2019, July). Presslight: Learning max pressure control to coordinate traffic signals in arterial network. In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining* (pp. 1290-1298).

- Wiedemann, R. (1974). Simulation des Strassenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen Heft 8. Universität Karlsruhe.
- Witsenhausen, H. (1966). A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(2), 161-167.
- Wolovich, W. A. (1974). *Linear Multivariable Systems*. New York: Springer Verlag.
- Wongpiromsarn, T., Uthaicharoenpong, T., Wang, Y., Frazzoli, E., & Wang, D. (2012, September). Distributed traffic signal control for maximum network throughput. In *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 588-595). IEEE.
- Yan, F., Tian, F. L., & Shi, Z. K. (2015). Iterative learning control approach for signaling split in urban traffic networks with macroscopic fundamental diagrams. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Ye, H., Michel, A. N., & Antsaklis, P. J. (1995, December). A general model for the qualitative analysis of hybrid dynamical systems. In *Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control* (Vol. 2, pp. 1473-1477). IEEE.
- Zeigler, B. P. (1989). DEVS representation of dynamical systems: Event-based intelligent control. *Proceedings of the IEEE*, 77(1), 72-80.
- Zeigler, B. P., Song, H. S., Kim, T. G., & Praehofer, H. (1995). DEVS framework for modelling, simulation, analysis, and design of hybrid systems. In *Hybrid Systems II 2* (pp. 529-551). Springer Berlin Heidelberg.
- Zhou, K., & Doyle, J. C. (1998). *Essentials of robust control* (Vol. 104). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- <https://circled.com.au/ft-drivetrain-control/4753-ft25-4-speed-gear-shift-knob.html>
- <https://mechcontent.com/sliding-mesh-gearbox/>
- <https://www.tomtom.com/traffic-index/jakarta-traffic/>. 2019

CURRICULUM VITAE



Nama : Endra Joelianto
Tempat/tgl lahir : Surakarta/8 Juli 1966
Kel. Keahlian : Instrumentasi dan Kontrol
Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10, Bandung
Nama Istri : Maria Ekawati Prasetyo
Nama Anak :1. Danika Laksmi Joelianto
2. Reinara Swasti Joelianto

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Program Profesi Insinyur (Ir.), Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung, 2020
- Doctor of Philosophy (Ph.D.), bidang Engineering, The Australian National University, Canberra, Australia, 2002
- Sarjana Teknik Fisika (Ir), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1990

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1	Staf Pengajar Teknik Fisika, FTI	1992-Sekarang
2	Anggota KK Instrumentasi dan Kontrol, FTI	2006-Sekarang
3	Ketua Laboratorium Kecerdasan Artifisial, Kontrol dan Otomasi, FTI	2018-Sekarang
4	Ketua Laboratorium Kontrol dan Otomasi Cerdas, FTI	2005-2018
5	Bendahara <i>QUE Grant</i> Teknik Fisika, FTI	2000-2001
6	Anggota Tim Kurikulum, sebagai PIC Kurikulum Prodi S2-Instrumentasi dan Kontrol, FTI	2013, 2019 dan 2024)
7	Penanggung Jawab Lomba Mahasiswa Tingkat Nasional <i>Programmable Logic Controller (PLC)</i> , Teknik Fisika, FTI	2007-2016
8	Anggota Pusat Studi Sistem Tanpa Awak	2010-Sekarang
9	Anggota NCSTT (<i>National Center for Sustainable Transportation Technology</i>)	2017-Sekarang
10	Anggota PUI - Teknologi Pertahanan dan Keamanan (PUSTEKHAN)	2017-Sekarang
11	Anggota PUI – <i>AI on Vision, NLP and Big Data Analytics</i>	2019-Sekarang
12	Anggota <i>Board of Reviewer</i> ITB	2017-Sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/a, 1 Maret 1992
- Penata Muda, III/a, 1 Januari 1994
- Penata Muda TK 1, III/b, 1 April 2001
- Penata, III/c, 1 April 2003
- Panata Tingkat I, III/d, 1 April 2020
- Pembina, IV/a, 1 April 2022

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Juli 1994
- Asisten Ahli (Inpasing), 1 Desember 2000
- Lektor, 1 Oktober 2002
- Lektor Kepala, 1 November 2019
- Profesor/Guru Besar, 1 Desember 2022

V. RIWAYAT DALAM ORGANISASI PROFESI

- Ketua IEEE Indonesia Instrumentation & Measurement/Information Theory Joint Society Chapter, 2020-Sekarang
- Ketua IEEE Indonesia Vehicular Technology/Intelligent Transportation System Joint Society Chapter, 2020-Sekarang
- Ketua Komunitas Instrumentasi dan Kontrol, PII-BKTF, 2022-Sekarang
- Ketua Komunitas Instrumentasi dan Kontrol, PII-BKTF, 2019-2022
- Koordinator Chapter IEEE Indonesia Section, 2017-Sekarang
- Ketua IEEE Indonesia Control System/Robotics & Automation Joint Society Chapter, 2010-2014

VI. KEGIATAN PENELITIAN (10 Tahun Terakhir)

1. **E. Joelianto**, A. Turnip, Ubaidillah, Pengembangan dan Pengujian Interaktif Medical Robot- Artificial Intelligence Assistive untuk Pasien Isolasi, Riset Kolaborasi Indonesia WCU Program, 2023
2. **E. Joelianto**, Pengembangan Sistem Kontrol Jaringan Lalu Lintas dengan Pengoptimalan Jumlah Pemilihan Sensor Lalu Lintas untuk Estimasi Arus Kendaraan, Riset Unggulan ITB, 2023.
3. **E. Joelianto**, IOT Pemantauan, Pendeteksian, Analisis dan Pengontrolan Wabah Dengue, LPDP RISPRO Invitasi, 2019-2023.

4. **E. Joelianto**, H.Y. Sutarto, Y.A. Hidayat, Sistem Kontrol Lalu-lintas Terkoordinasi Berbasis Machine Learning untuk Manajemen Kemacetan Kendaraan di Jaringan Jalan, Penelitian Dasar Kompetitif Nasional, 2022-2023.
5. **E. Joelianto**, A. Widyotriatmo, H. Rahadian, Pengembangan Metode Deteksi dan Klasifikasi Anomali Berbasis Deep Learning pada Industrial Control System (ICS) untuk Penentuan Langkah Mitigasi, Penelitian Disertasi Doktor, 2022-2023.
6. Y.Y. Nazaruddin, **E. Joelianto**, S. Bandong, Pengembangan Sistem Otomasi RTGC Yang Berbasis Citra Dan LIDAR Untuk Minimalisasi Dwell Time Horizontal Transfer Kontainer Di Pelabuhan, Penelitian Disertasi Doktor, 2022.
7. Y.Y. Nazaruddin, **E. Joelianto**, S. Lukman, Pemodelan Path Loss Two Ground Reflection untuk Kereta Api Cepat dengan Komunikasi Data 5G, Penelitian Disertasi Doktor, 2022.
8. **E. Joelianto**, T. Simarmata, P. Sihombing, H. Fakhrurroja, P. Sumari, Rekacipta Artificial Intelligence Precision Farming Berbasis Sistem Drip dan Foliar Feeding untuk Tanaman Cabai, Riset Kolaborasi Indonesia, 2022.
9. **E. Joelianto**, Y.Y. Nazaruddin, M.I. Mandasari, Pengembangan Sistem Detektor 3D yang Berbasis Citra dan Lidar untuk Minimalisasi Dwell Time Horizontal Transfer Kontainer di Pelabuhan, Program Riset ITB, 2022.
10. **E. Joelianto**, T. Simarmata, P. Sihombing, A. Turnip, V. Nadhira, Artificial Intelligence Precision Farming Untuk Meningkatkan Produktifitas Dan Kualitas Tanaman Cabai, Program Penelitian Kolaborasi Indonesia, 2021.
11. **E. Joelianto**, Y.Y. Nazaruddin, A. Widyotriatmo, Sistem Kontrol Impulsive untuk Peredaman Serangan pada Konsensus Agen Jamak, Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (PPMI) ITB, 2021.
12. **E. Joelianto**, Pengembangan Sistem Kontrol Kecepatan Berbasis Kecerdasan Buatan Pada Switched Reluctance Motor (SRM) Untuk Kendaraan Listrik, Riset Pengembangan Unggulan ITB, 2021.
13. **E. Joelianto** and S. Gautama, Traffic Management Towards Society 5.0, World Class Professor (WCP) Grant, 2021.
14. **E. Joelianto**, Non-contact Robot for Lift Operation untuk Bantu Kurangi Penyebaran COVID019, Program Penelitian COVID-19, Institut Teknologi Bandung, 2020.

15. **E. Joelianto**, Transformasi Dijital Kantin Sebagai Co-Learning Space di Sekolah Menengah Umum, Program Pengabdian Masyarakat, ITB, 2020.
16. **E. Joelianto**, IoT Video Based Container Tracking Detector System in Port Automation Using Ghost Imaging and Deep Learning, ITB Research Grant, 2020.
17. Y. Y. Yunazwin, **E. Joelianto**, Selvi Lukman, Sistem Deteksi Posisi Kereta Api Cepat Indonesia Menggunakan Gabungan Deep Belief Network dan Particle Filter, ITB Research Grant, 2020.
18. **E. Joelianto**, H.Y. Sutarto, Yosi A. Hidayat, Pengembangan Algoritme dan Validasi Estimasi dan Prediksi Waktu Tempuh Kendaraan Berbasis GPS untuk Sistem Manajemen Trafik Penelitian Berbasis Kompetensi, KEMENRISTEKDIKTI, 2018-2020.
19. **E. Joelianto**, Miranti. I. Mandasari, Yosi A. Hidayat Sistem Kontrol dan Otomasi Kereta Api Ringan-Sistem Aeromovel, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, KEMENRISTEKDIKTI, 2018-2020.
20. **E. Joelianto**, Fast Charging/Discharging for Electric Vehicle, KEMENRISTEKDIKTI Program Riset Tesis Magister, 2019.
21. **E. Joelianto**, Sistem Keselamatan untuk Kendaraan Listrik: Motor Auto Shut Off dan Motor Auto Load, KEMENRISTEKDIKTI Program Riset Tesis Magister, 2019.
22. **E. Joelianto**, Cyber Physical System and Industry 4.0, Innovation Research Program, ITB, 2018.
23. **E. Joelianto**, Pembuatan Galeri Seni Dijital Bergerak, Berenergi Hijau, Berotomasi dan Berbasis Teknologi Informasi Dijital, Pengabdian Kepada Masyarakat ITB, 2018.
24. P. Siregar, **E. Joelianto**, E. Juliastuti, Kontrol Penjejakan Kendaraan Tanpa Awak di Pelabuhan Menggunakan Sensor Tracking Video, Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi, KEMENRISTEKDIKTI, 2018-2019.
25. **E. Joelianto**, Yul Y. Nazaruddin, A. Widyotriatmo, Cyber Physical Control Systems in Industry 4.0, P3MI – ITB, 2018.
26. **E. Joelianto**, A. Widyotriatmo, Yosi A. Hidayat, SWARM Intelligence Optimization for Enhancing Network Robustness againts Cascading Failures, Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi ITB, 2017.
27. **E. Joelianto**, H.Y. Sutarto, A. Widyotriatmo, Pengembangan Sensor Bergerak berbasis GPS untuk Sistem Manajemen Trafik Lalu Lintas, Riset Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK), Menristek, 2017.

28. **E. Joelianto**, Uji Lapangan Variable Speed Drive (VSD) Controller, Innovation Research Program, LPIK-ITB, 2016.
29. **E. Joelianto**, A. Widyotriatmo, Yosi A. Hidayat, SWARM Intelligence Optimization for Enhancing Network Robustness againsts Cascading Failures, Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi ITB, 2016.
30. **E. Joelianto**, H.Y. Sutarto, Yosi A. Hidayat, Pengembangan Sensor Bergerak berbasis GPS untuk Sistem Manajemen Trafik Lalu Lintas, Riset Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK), Menristek, 2016.
31. **E. Joelianto**, Intelligent, Optimal and Efficient Variable Speed Drive (VSD) Controller, Innovation Research Program, ITB, 2015.
32. **E. Joelianto**, Analisis Parameter Seismotektonik untuk Identifikasi Perkursor dan Estimasi dalam Upaya Mitigasi Gempa Bumi, Innovation and Research Grant, ITB, 2015.
33. **E. Joelianto**, High Performance Speed Motor Control using Intelligent Based Hybrid Reference Control, Innovation Research Grant, ITB, 2014.
34. **E. Joelianto**, Development of Linear Hybrid Stochastic Identification Technique for Event Detection Application of Urban Traffic Flow Decentralized Research Grant, ITB, 2013.
35. **E. Joelianto**, Seismic Hazard Detection using ANFIS and Chaotic Detection of Earthquake Time Series, Innovation Research Grant, ITB, 2013.

VII. PUBLIKASI (Jurnal dan Buku)

A. Jurnal Internasional

1. Kirana, R.C., Purwanto, N.A., Azis, N.A., **Joelianto, E.**, Santosa, S.P., Budiman, B.A. and Turnip, A., 2023. Failure assessment in lithium-ion battery packs in electric vehicles using the failure modes and effects analysis (FMEA) approach. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 14(1), pp.94-104.
2. Bandong, S., Nazaruddin, Y.Y. and **Joelianto, E.**, 2023. Faster RCNN mixed-integer optimization with weighted cost function for container detection in port automation. *Heliyon*, 9(2), e13213.
3. Widyotriatmo, A., **Joelianto, E.**, Burohman, A.M., Damanik, J.J. and Nazaruddin, Y.Y., 2023. Polygon formation of multiple nonholonomic mobile robots with double-level-control collision avoidance scheme. *Journal of Control and Decision*, 10(3), pp. 301-313.

4. Turnip, A., Sihombing, P., Fitriatin, B.N., Simarmata, T., Tampubolon, G.M., Turmuktini, T., **Joelianto, E.**, 2022. Development of Irrigation System and Nutrition Prediction Model with ANFIS Method for Chili Plants. *International Journal of Artificial Intelligence*, 20(2), pp. 37-47.
5. Fuad, M.R.T., Fernandez, E.O., Mukhlis, F., Putri, A., Sutarto, H.Y., Hidayat, Y.A. and **Joelianto, E.**, 2022. Adaptive Deep Q-Network Algorithm with Exponential Reward Mechanism for Traffic Control in Urban Intersection Networks. *Sustainability*, 14(21), p.14590.
6. Siswoyo, A.A., **Joelianto, E.** and Sutarto, H.Y., 2022. Traffic Congestion Estimation using Video without Vehicle Tracking. *Internetworking Indonesia Journal*, 14(1), pp. 33-37.
7. **Joelianto, E.**, Utami, F.P., Sutarto, H.Y., Gautama, S., Semajski, I. and Fathurrahman, M.F., 2022. Performance Analysis of Max-Pressure Control System for Traffic Network using Macroscopic Fundamental Diagram. *International Journal of Artificial Intelligence*, 20(2), pp.1-23.
8. **Joelianto, E.**, Rahmat, B., Siregar, P.I., Juliastuti, E. and Bandong, S., 2022. Performance of Optimized CSK, DFT, and LOT for Video-based Container Tracking System using Simulated Annealing. *Engineering Letters*, 30(3), EL_30_3_16.
9. Wahid, M.R., Zakaria, D., Irawan, E.N. and **Joelianto, E.**, 2022. Control Strategy in Electric Vehicle: A Visualized Bibliometric Analysis. *International Journal of Sustainable Transportation*, 5(1), pp.23-31.
10. **Joelianto, E.**, Fathurrahman, M.F., Sutarto, H.Y., Semajski, I., Putri, A. and Gautama, S., 2022. Analysis of Spatiotemporal Data Imputation Methods for Traffic Flow Data in Urban Networks. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5), p.310.
11. Lukman, S., Nazaruddin, Y.Y., Ai, B. and **Joelianto, E.**, 2022. Path Loss Modelling for High Speed Rail in 5G Communication System. *International Journal of Technology*, 13(4), pp. 848-859.
12. Lukman, S., Nazaruddin, Y.Y., Ai, B. and **Joelianto, E.**, 2022. The Optimal Design of 26 Ghz 5G-R Microstrip MIMO Outdoor Antennas for Future Railway Mobile Communication System. *Engineering Letters*, 30(4), EL_30_4_54.
13. Lukman, S., Nazaruddin, Y.Y., Ai, B. and **Joelianto, E.**, 2022. The new empirical path loss model for line of sight propagation in HSR communication system using optimization technique. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(9), pp.1810-1814.

14. Wahid, M.R., Budiman, B.A., **Joelianto, E.** and Aziz, M., 2021. A review on drive train technologies for Passenger Electric Vehicles. *Energies*, 14(20), p.6742.
15. **Joelianto, E.**, Suryana, L.R., Widyotriatmo, A., Hidayat, Y.A., 2021. Optimal Control Strategy for Automated People Mover System using Robust H^∞ Integral-Backstepping MIMO PID Controller, *International Journal of Artificial Intelligence*, 19(2), pp. 86-112.
16. Hidayat, Y.A., Rustandi, and **Joelianto, E.**, 2021. Integrated Supply Chain Model of Distribution Regionalization and Network Optimization of White Crystal Sugar Traditional Market. *Engineering Letters*, 29(1), EL_29_1_35.
17. **Joelianto, E.**, 2021. On Minimal Second-order IIR Bandpass Filters with Constrained Poles and Zeros. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 53(4), p.210401.
18. Matondang, H.H., **Joelianto, E.** and Widiyantoro, S., 2020. Application of Butterworth high pass filter as an approximation of Wood Anderson seismometer frequency response to earthquake signal recording. *ACTA IMEKO*, 9(5), pp. 379-382.
19. Suryana, L.E., **Joelianto, E.** and Hidayat, Y.A., 2020. Grey-Box Modelling and Validation of APMS (Automated People Mover System) Train. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, 12(4), pp. 956-965.
20. **Joelianto, E.**, Nainggolan, A. and Hidayat, Y.A., 2020. Stingless bee algorithm for numerical optimization problems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 16(6), pp. 2063-2081.
21. **Joelianto, E.**, Sutarto, H.Y., Airulla, D.G. and Zaky, M., 2020. Design and simulation of traffic light control system at two intersections using max-plus model predictive control. *International Journal of Artificial Intelligence*, 18(1), pp. 97-116.
22. Antony, P., Antonyová, A. and **Joelianto, E.**, 2020. Management the Quality Control of Application the Adhesive on a Flat Material. *International Journal of Artificial Intelligence*, 18(1), pp. 148-162.
23. Burohman, A.M., **Joelianto, E.** and Widyotriatmo, A., 2020. Collision-Free Stable Polygon Formation of Multi-Agent Robots, *International Journal of Artificial Intelligence*, 18(1), pp. 163-176.
24. Sumaryo, S., Halim, A., Ramli, K. and **Joelianto, E.**, 2019. Queueing theory based accelerated traffic discharging model in front of emergency vehicle

- on intersection. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 14(3), pp. 213-238.
25. Valentino, K., Christian, K. and **Joelianto, E.**, 2019. Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator. *Internetworking Indonesia Journal*, 11(1), pp. 23-28.
 26. Kuswana, G.S., Ramadhan, S.A., **Joelianto, E.**, and Sutarto, H.Y., 2019. Number of Vehicles and Travel Time Estimation on Urban Traffic Network using Bayesian Network Model and Particle Filtering Method. *Internetworking Indonesia Journal*, 11(1), pp. 35-40.
 27. Ramadhan, S.A., **Joelianto, E.** and Sutarto, H.Y., 2019. Simulation of Traffic Control Using Vissim-COM Interface. *Internetworking Indonesia Journal*, 11(1), pp. 55-61.
 28. Tamba, T.A. and **Joelianto, E.**, 2019. Network utility maximisation through particle swarm optimisation. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 10(1), pp. 67-79.
 29. Gunawan, W.W., Likafia, A., **Joelianto, E.** and Widyotriatmo, A., 2018. Inverted Pendulum Stabilization with Flying Quadrotor, *Internetworking Indonesia Journal*, 10(2), pp. 29-35.
 30. Rahmat, B., **Joelianto, E.**, Purnama, I.K.E. and Purnomo, M.H., 2018. An Improved Mean Shift Performance Using Switching Kernels for Indonesia Vehicle License Plate Tracking Video. *Internetworking Indonesia Journal*, 10(2), pp. 49-56.
 31. Rahmat, B., **Joelianto, E.**, Purnama, I.K.E. and Hery, M., 2018. An Improved Mean Shift Using Adaptive Fuzzy Gaussian Kernel for Indonesia Vehicle License Plate Tracking. *IAENG International Journal of Computer Science*, 45(3), IJCS_45_3_10.
 32. Sutarto, H.Y., **Joelianto, E.** and Nugroho, T.A., 2017. Developing a stochastic model of queue length at a signalized intersection. *International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(6), pp.2183-2188.
 33. Hidayat, Y.A., Widiastuti, K.R. and **Joelianto, E.**, 2017. Refinery Scheduling for Naphta Hydrotreater Unit using Nonlinear Programming. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(18), pp. 4606-4612.
 34. Widyotriatmo, A., **Joelianto, E.**, Prasdianto, A., Bahtiar, H. and Nazaruddin, Y.Y., 2017. Implementation of Leader-Follower Formation Control of a Team of Nonholonomic Mobile Robots. *International Journal of Computers Communications & Control*, 12(6), pp. 871-885.

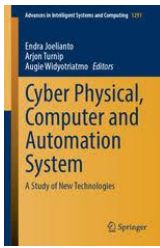
35. Zaky, M., Airulla, D.G., **Joelianto, E.** and Sutarto, H.Y., 2017. Urban Traffic Simulation Using SUMO Open Source Tools. *Internetworking Indonesia Journal*, 9(1), pp. 83-88.
36. Valentino, K., Christian, K. and **Joelianto, E.**, 2017. Virtual reality flight simulator. *Internetworking Indonesia Journal*, 9(1), pp. 21-25.
37. **Joelianto, E.** and Prakoso, B., 2017. Stingless bee foraging behaviour algorithm for optimisation. *International Journal of Artificial Intelligence*, 15(1), pp. 1-20.
38. Antonyová, A., Antony, P. and **Joelianto, E.**, 2017. An Automatic Control System of the Flotation Process for The Reduction of Water Pollution. *International Journal of Ecology & Development™*, 32(2), pp. 121-132.
39. Rahmat, B., **Joelianto, E.**, Purnama, I.K.E. and Hery, M., 2016. Vehicle license plate image segmentation system using cellular neural network optimized by adaptive fuzzy and neuro-fuzzy algorithms. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 11(12), pp. 383-400.
40. Solikhatun, Saragih, R., **Joelianto, E.** and Naiborhu, J., 2016. Robust H^∞ Control for Bilinear Systems Using the Dynamic Takagi-Sugeno Fuzzy Models Based on Linear Matrix Inequalities. *International Journal of Control and Automation*, 9(7), pp. 7-22.
41. Solikhatun, Saragih, R. and **Joelianto, E.**, 2016. Reduced Order Bilinear Time Invariant System by Means of Error Transfer Function Least Upper Bounds. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, 16(2), pp. 206–220.
42. Abady, H. and **Joelianto, E.**, 2016. Energy Aware Distributed Estimator System over Wireless Sensor Networks with Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing Algorithm. *Internetworking Indonesia Journal*, 8(1), pp.23-28.
43. Turnip, A., Soetraprawata, D., Turnip, M. and **Joelianto, E.**, 2016. EEG-based brain-controlled wheelchair with four different stimuli frequencies. *Internetworking Indonesia Journal*, 8(1), pp. 65-69.
44. Antonyová, A., Antony, P. and **Joelianto, E.**, 2015. Modeling of dynamic responses in building insulation. *Journal Eng. Technol. Sci.*, 47(5), pp. 536-548.
45. Sompotan, A.F., Puspito, N.T., **Joelianto, E.** and Hattori, K., 2015. Analysis of Ionospheric Precursor of Earthquake using GIM-TEC, Kriging and Neural Network. *Asian Journal of Earthquake Sciences (AJES)*, 8(2), pp. 32-44.

46. Sutarto, H.Y., Boel, R.K. and **Joelianto, E.**, 2015. Parameter estimation for stochastic hybrid model applied to urban traffic flow estimation. *IET Control Theory & Applications*, 9(11), pp. 1683-1691.
47. Sutarto, H.Y. and **Joelianto, E.**, 2015. Modeling, Identification, Estimation and Simulation of Urban Traffic Flow in Jakarta-Bandung. *Journal of Mechatronics, Electrical Power and Vehicular Technology*, 6(1), pp. 57-66.
48. Sutarto, H.Y. and **Joelianto, E.**, 2015. Expectation-maximization based parameter identification for HMM of urban traffic flow. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 53(2), pp. 90-101.
49. **Joelianto, E.**, 2014. Finite horizon optimal hybrid reference control for improving transient response of feedback control systems. *International Journal of Systems Science*, 45(9), pp. 1814-1829.
50. Antonyová, A., Antony, P. and **Joelianto, E.**, 2013. Statistical analysis as approach to reliability testing of thermal properties in building insulation. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 48(8), pp. 1-14.
51. Megawati, N.Y., Salmah, Wijayanti, I.E., **Joelianto, E.** and Budiyono, A., 2013. Safety Analysis of Complex Eigenvalues with SOS. *International Journal of Imaging and Robotics*, 10(2), pp. 105-120.
52. Salmah, S., Megawati, N.Y., **Joelianto, E.** and Budiyono, A., 2013. Control of autonomous helicopter models with robust H2-type switched linear controller. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 35(5), pp. 137-148.
53. **Joelianto, E.**, Setiawan, A. and Chaerani, D., 2013. Hardware in the Loop Simulation of Railway Traffic Re-scheduling by Means of MILP Algorithm during Disturbances. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 35(5), pp. 45-66.
54. **Joelianto, E.**, Anura, D.C. and Priyanto, M., 2013. ANFIS-hybrid reference control for improving transient response of controlled systems using PID controller. *International Journal of Artificial Intelligence*, 10(S13), pp. 88-111.
55. **Joelianto, E.**, Maryami Sumarjono, E., Budiyono, A. and Retnaning Penggalih, D., 2011. Model predictive control for autonomous unmanned helicopters. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 83(6), pp. 375-387.
56. **Joelianto, E.** and Wiranto, I., 2011. An Application of Ant Colony Optimization, Kalman Filter and Artificial Neural Network for Multiple

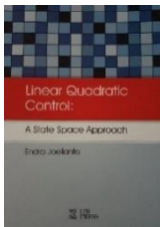
- Target Tracking Problems. *International Journal of Artificial Intelligence*, 7(A11), pp. 384-400.
57. Pradana, W.A., **Joelianto, E.**, Budiyo, A. and Adiprawita, W., 2011. Robust MIMO H^∞ integral-backstepping PID controller for hovering control of unmanned model helicopter. *Journal of Aerospace Engineering*, 24(4), pp. 454-462.
 58. **Joelianto, E.** and Kadarusman, L., 2010. Industrial Control Quality Improvement using Statistical Process Control: Tennessee Eastman Process Simulation Case. *Internetworking Indonesia Journal*, 2(1), pp. 23-28.
 59. **Joelianto, E.** and Sitanggang, P.H., 2009. A Subtractive Clustering Based Fuzzy Hybrid Reference Control Design for Transient Response Improvement of PID Controller. *ITB Journal of Engineering Science*, 41(2), pp. 167-186.
 60. **Joelianto, E.** and Williamson, D., 2009. Transient response improvement of feedback control systems using hybrid reference control. *International Journal of Control*, 82(10), pp. 1955-1970.
 61. **Joelianto, E.** and Hosana, 2009. Loop-back Action Latency Performance of an Industrial Data Communication Protocol on a PLC Ethernet Network, *Internetworking Indonesia Journal*, 1(1), pp. 11-18.
 62. **Joelianto, E.**, Widiyantoro, S. and Ichsan, M., 2009. Time series estimation on earthquake events using ANFIS with mapping function. *International Journal of Artificial Intelligence*, 3(A09), pp. 37-63.
 63. **Joelianto, E.** and Rahmat, B., 2008. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) with Error Back propagation Algorithm using Mapping Function. *International Journal of Artificial Intelligence*, 1(A08), pp. 3-22.

B. Buku

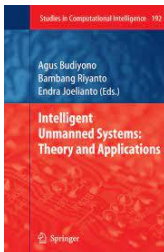
1. **Joelianto, E.**, Turnip, A. and Widyotriatmo, A., (Eds.), 2021. *Cyber Physical, Computer and Automation System A Study of New Technologies*. Springer Nature, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore. eISBN 978-981-334-062-6.



2. **Joeliyanto, E.**, 2017. Linear Quadratic Control: A State-Space Approach. ITB Press, Bandung-Indonesia. ISBN 978-602-5417-42-9.



3. Budiyo, A., Riyanto, B. and **Joeliyanto, E.**, (Eds), 2009. Intelligent Unmanned System: Theory and Application. Studies on Computational Intelligence, 192, Springer, Berlin-Germany. ISBN 978-3-642-00263-2



C . Paten

1. **Joeliyanto, E.**, Santosa, S.P., Kirana, R.C., dan Purwanto, N.A., 2023. Alat dan Metode Keselamatan untuk Kendaraan Listrik, IDP000089259. Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia, Indonesia.

VIII. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 Tahun, 2006
- Satyalancana Karya Satya 20 Tahun, 2016
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB, 2017

- Winning Awards of Challengers Problem of AUN-SEED Field Wise Seminar (FWS), Tokyo-Japan, 2007
- Best Poster Nominee, The 6th International Conference on Intelligent Unmanned Systems (ICIUS), Bali-Indonesia, 2010
- Best Paper Award KINEMATICS 2016, The 3rd International Conference on Kinematics, Mechanics of Rigid Bodies, and Materials 2016, Bali-Indonesia, 2016
- Best Paper Award in the 3rd International Conference on Robotics, Biomimetics & Intelligent Computational Systems 2018 (ROBIONETICS 2018), Bandung-Indonesia, 2018
- Senior Member Institute of Electrical and Electronics Engineers (SM IEEE), 2019
- Best Paper Award in the 5th International Conference on Industrial Internet of Things (ICIIoT 2019), Kuta-Bali-Indonesia, 2019
- Best Paper Award in the International Conference on Cyber Physical, Computer and Automation System (CPCAS 2019), Kuta-Bali-Indonesia, 2019
- Penghargaan di Bidang Karya Inovasi pada Dies Natalis ke-62 ITB, 2021
- Best Presenter, Riset Kolaborasi Indonesia, World Class University (WCU) Program, 2021

IX. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Pendidik sebagai dosen profesional, 2011, Kementerian Pendidikan Nasional
- Sertifikasi Asesor Kompetensi, 2017-2020, Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP)
- Sertifikasi Asesor Kompetensi, 2020-2023, Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-334-3

