

BIDANG PENDIDIKAN DAN PENGAJARAN
BERITA ACARA PERKULIAHAN

PERIODE SEMESTER GANJIL 2023-2024

MATA KULIAH:

SISTEM KENDALI OPTIMAL

LAMPIRAN BERITA ACARA PERKULIAHAN :

- 1. SK.DEKAN FTI SEMESTER GANJIL 2023/2024*
- 2. PRESENSI KEHADIRAN DOSEN DAN MATERI AJAR*
- 3. CONTOH HAND OUT MATERI AJAR*
- 4. NILAI KOMULATIF; KEHADIRAN, TUGAS, UTS DAN UAS*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL



YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024
Email : humas@istn.ac.id Website : www.istn.ac.id

SURAT PENUGASAN TENAGA PENDIDIK

Nomor : 287/03.1 - G / IX / 2023

SEMESTER **GANJIL**, TAHUN AKADEMIK 2023 / 2024

Nama	: M. Ikrar Yamin, ST.MTrT	Status Pegawai	: Edukatif Tetap		
NIK	:	Program Studi	: Teknik Elektro		
Jabatan Akademik	:				
Bidang	Perincian Kegiatan	Tempat	Jam/ Minggu	Kinerja (sks)	Keterangan
I PENDIDIKAN Dan PENGAJARAN	MENGAJAR DI KELAS (KULIAH / RESPONSI DAN LABORATORIUM)				
	1. Mekatronika (Kls K) S1 Teknik Mesin))			3	Sabtu, 08.00-10.40
	2. Mekatronika (Kls A) S1 Teknik Mesin))			3	Jumat, 08.00-09.40
	3. Prak.Pengukuran Besaran Listrik (K)			1	
	4. Sistem Optimasi (K)			3	Sabtu, 13.00-15.30
	5. Estimasi & Identifikasi (A)			2	Selasa, 13.00-15.30
	6. Matematika Teknik 1 (K)			3	Sabtu, 19.00-21.00
	7. Sistem Kendali Optimal (A)			3	Senin, 15.00-16.50
	8. Sistem Optimasi (A)			2	Rabu, 15.40-17.20
	9.				
	10.				
	11.				
	12.				
	13.				
	14.				
	15.				
	16.				
	17. Membimbing Skripsi / Tugas Akhir				
18. Menguji Skripsi / Tugas Akhir					
II PENELITIAN	1. Penelitian Ilmiah			1	
	2. Penulisan Karya Ilmiah				
	3. Penulisan Diktat Kuliah				
	4. Menerjemahkan Buku				
	5. Pembuatan Rancangan Teknologi				
	6. Pembuatan Rancangan & Karya Pertunjukan				
III PENGABDIAN DAN MASYARAKAT	1. Menduduki Jabatan di Pemerintahan				
	2. Pengembangan Hasil Pendidikan Dan Penelitian				
	3. Memberikan Penyuluhan/Pelatihan/Ceramah pada masyarakat				
	4. Memberikan Pelayanan Kepada Masyarakat Umum				1
	5. Menulis Karya Pengabdian Pada Masyarakat yang tidak dipublikasikan				
	6. Komersial / Kesepakatan				
IV UNSUR-UNSUR PENUNJANG	1. Jabatan Struktural			2	
	2. Penasehat Akademik				
	3. Berperan serta aktif dalam pertemuan ilmiah / seminar				1
	4. Pengembangan program kuliah / Kelompok Ilmu Elektro				
	5. Menjadi anggota panitia / Badan pada suatu Perguruan Tinggi				
	6. Menjadi anggota Badan Lembaga Pemerintah				
	7. Menjadi Anggota Organisasi Profesi				
	8. Mewakili PT / Lembaga Pemerintah duduk dalam Panitia antar Lembaga				
	9. Menjadi Anggota Delegasi Nasional ke Parlemen - Parlemen Internasional				
Jumlah Total				25	

Kepada yang bersangkutan akan diberikan gaji / honorarium sesuai dengan peraturan penggajian yang berlaku di Institut Sains dan Teknologi Nasional
Penugasan ini berlaku dari tanggal 25 September 2023 sampai dengan tanggal 31 Maret 2024.



Jakarta, 3 Oktober 2023
Dekan,

(Signature)

(Dr. Musfirah Cahya F.T.S.Si.,M.Si.)

Tembusan :

1. Direktur Akademik - ISTN
2. Direktur Non Akademik - ISTN
3. Ka. Biro Sumber Daya Manusia - ISTN
4. Kepala Program Studi Fak.
5. Arsip



BERITA ACARA PERKULIAHAN
(PRESENTASI KEHADIRAN DOSEN)
SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2023/2024
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S.1 & D.III -ISTN

Mata Kuliah/kode	:	Sistem Kendali Optimal /22254SKD07	Semester	:	Ganjil
Dosen	:	M.Ikrar Yamin, ST, MTrT	SKS	:	3
Hari	:	Senin	Kelas	:	A
Jam	:	15:00-16:50	Ruang	:	C-5

No.	TANGGAL	MATERI KULIAH	JML MHS HADIR	TANDA TANGAN DOSEN
1.	25-9-2023	Pengantar Kuliah Teknik Kendali Optimal	7	
2.	2-10-2023	Konsep dan Jenis Sistem Kendali	7	
3.	9-10-2023	Model Mekanik	7	
4.	16-10-2023	Model Elektrik	7	
5.	23-10-2023	Ruang Keadaan (State Space)	7	
6.	30-10-2023	State Feedback Controller	7	
7.	6-11-2023	Pole Placement	7	
8.	20-11-2023	UJIAN TENGAH SEMESTER (UTS)	6	



BERITA ACARA PERKULIAHAN
(PRESENTASI KEHADIRAN DOSEN)
SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2022/2023
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO S.1 & D.III -ISTN

Mata Kuliah/kode	:	Sistem Kendali Optimal /22254SKD07	Semester	:	Ganjil
Dosen	:	M.Ikrar Yamin, ST, MTrT	SKS	:	3
Hari	:	Senin	Kelas	:	A
Jam	:	15:00-16:50	Ruang	:	C-5

No.	TANGGAL	MATERI KULIAH	JML MHS HADIR	TANDA TANGAN DOSEN
9.	27-11-2023	Optimal Control Pontagryn	7	
10.	4-12-2023	Kontrol Optimal LQR	7	
11.	11-12-2023	Contoh Soal Kontrol Optimal LQR	7	
12.	18-12-2023	Jurnal terkait LQR	7	
13.	8-1-2024	LQR pada pengaturan kecepatan Motor DC	7	
14.	11-1-2024	Metode LQR dengan MATLAB	7	
15.	15-1-2024	Pengantar LQE dan LQG	7	
16.	22-1-2024	UJIAN AKHIR SEMESTER (UAS)	6	

DOSEN PENGAJAR

(Muhammad Ikrar Yamin, ST., MTrT)



DAFTAR HADIR PESERTA KULIAH MAHASISWA
GANJIL - REGULER - TAHUN 2023/2024

FAK / JURUSAN
MATAKULIAH
KELAS / PESERTA
KURIKULUM
DOSEN

Teknik Elektro S1
Sistem Kendali Optimal / 22254SKD07 / 5
A / 7
2023
1.Moh. Ikrar Yamin, ST.MTrT

HARI / TANGGAL
JAM KULIAH
RUANG

Senin
15:00-16:50

Hal : 1 / 1

No	NIM	NAMA MAHASISWA	TANGGAL PERTEMUAN							JUMLAH	
			25/9/23	2/10/23	9/10/23	16/10/23	23/10/23	30/10/23	6/11/23		20/11/23
1	20220001	MUHAMMAD AGUNG RAHMANSYAH	—	2/10/23	—	✓	—	—	—	—	—
2	20220004	MUHAMMAD RAFLY JULIANSYAH	Agung	Agung	Agung	Agung	Agung	Agung	Agung	Agung	8
3	20220007	FAZRYAN DWICAHYA	Fazryan	Fazryan	Fazryan	Fazryan	Fazryan	Fazryan	Fazryan	Fazryan	8
4	20220009	ABYAN SYAFIQ ANDANA PUTRA	Abyan	Abyan	Abyan	Abyan	Abyan	Abyan	Abyan	Abyan	8
5	21220002	WAHYU OCTAVIANO	Wahyu	Wahyu	Wahyu	Wahyu	Wahyu	Wahyu	Wahyu	Wahyu	8
6	21220003	HARRY TODING KARURUNG	✓	✓	Harry	Harry	Harry	Harry	Harry	Harry	8
7	23220701	ANTONIUS PURWOSUTEDJO	Apri	Apri	Apri	Apri	Apri	Apri	Apri	Apri	8

CATATAN :

Perubahan peserta hanya diperkenankan bila ada persetujuan tertulis dari Pelaksana Jurusan.

25/09/2023

Jakarta, 20-11-2023

Dosen Pengajar,

(Moh. Ikrar Yamin, ST.MTrT)



DAFTAR HADIR PESERTA KULIAH MAHASISWA
GANJIL - REGULER - TAHUN 2023/2024

FAK / JURUSAN
MATAKULIAH
KELAS / PESERTA
KURIKULUM
DOSEN

Teknik Elektro S1
Sistem Kendali Optimal / 22254SKD07 / 5
A / 7
2023
1.Moh. Ikrar Yamin, ST.MTrT

HARI / TANGGAL
Senin
JAM KULIAH
15:00-16:50
RUANG

Hal : 1 / 1

No	N I M	NAMA MAHASISWA	TANGGAL PERTEMUAN								JUMLAH
			27/11/23	4/12/23	11/12/23	18/12/23	8/1/23	11/1/23	15/1/23	22/1/23	
1	20220001	MUHAMMAD AGUNG RAHMANSYAH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	20220004	MUHAMMAD RAFLY JULIANSYAH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
3	20220007	FAZRYAN DWICAHYA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
4	20220009	ABYAN SYAFIQ ANDANA PUTRA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
5	21220002	WAHYU OCTAVIANO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
6	21220003	HARRY TODING KARURUNG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
7	23220701	ANTONIUS PURWOSUTEDJO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8

CATATAN :

Perubahan peserta hanya diperkenankan bila ada persetujuan tertulis dari Pelaksana Jurusan.

Jakarta, ... 22-1-2023 ...

Dosen Pengajar,

(Moh. Ikrar Yamin, ST.MTrT)

25/09/2023

DAFTAR NILAI

SEMESTER GANJIL REGULER TAHUN 2023/2024

Program Studi : Teknik Elektro S1

Matakuliah : Sistem Kendali Optimal

Kelas / Peserta : A

Perkuliahhan : Kampus ISTN Bumi Srengseng Indah

Dosen : Moh. Ikrar Yamin, ST.MTrT

Hal. 1/1

No	NIM	N A M A	ABSEN	TUGAS	UTS	UAS	MODEL	PRESENTASI	NA	HURUF
			10%	20%	30%	40%	0%	0%		
1	20220001	Muhammad Agung Rahmansyah	100	0	0	0	0	0	0	
2	20220004	Muhammad Rafly Juliansyah	100	63	50	50	0	0	57.6	C
3	20220007	Fazryan Dwicahya	100	79	80	80	0	0	81.8	A
4	20220009	Abyan Syafiq Andana Putra	100	89	80	60	0	0	75.8	A-
5	21220002	Wahyu Octaviano	100	58	60	70	0	0	67.6	B-
6	21220003	Harry Toding Karurung	100	58	60	70	0	0	67.6	B-
7	23220701	Antonius Purwosutedjo	100	95	85	80	0	0	86.5	A

Rekapitulasi Nilai							
A	2	B+	0	C+	0	D+	0
A-	1	B	0	C	1	D	0
		B-	2	C-	0	E	0

Jakarta, 23 February 2024

Dosen Pengajar



Moh. Ikrar Yamin, ST.MTrT



SISTEM KONTROL OPTIMAL

LQR

MUHAMMAD IKRAR YAMIN, ST., MTrT

TUJUAN PEMBELAJARAN

- Mahasiswa memahami LQR
- Mahasiswa dapat mendesain sistem control LQR

KONSEP DASAR

- **LQR adalah singkatan dari "Linear Quadratic Regulator," yang merupakan sebuah metode desain pengendali (kontrol) linier untuk sistem dinamis. Metode ini digunakan untuk merancang pengendali linier yang optimal dalam hal meminimalkan fungsi kriteria kuadrat tertentu.**

FORMULASI LQR

Secara umum, formulasi masalah optimal LQR adalah sebagai berikut:

1. Sistem Dinamis:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

Di mana:

1. x adalah vektor keadaan sistem.
2. u adalah sinyal kontrol (input).
3. $A, B,$ dan C adalah matriks yang mendefinisikan sistem.

2. Fungsi Kriteria:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

Di sini, Q dan R adalah matriks bobot yang memungkinkan penyesuaian preferensi antara minimisasi keadaan dan kontrol.

TUJUAN DAN APLIKASI

- Tujuan dari permasalahan ini adalah merancang sinyal kontrol $u(t)$ sehingga fungsi kriteria J diminimalkan. Solusi kontrol optimal $u^*(t)$ dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan Riccati, yang pada akhirnya menghasilkan pengendali state feedback proporsional.
- Metode LQR sangat umum digunakan dalam kontrol optimal dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kendali pesawat, kontrol robot, dan sistem kontrol lainnya di mana asumsi model linier dapat diterapkan.

PERANCANGAN

- Diketahui persamaan state

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

- Desain system control feedback state

$$u(t) = -Kx(t)$$

- Dengan meminimalkan indeks performansi

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Q x + u^* R u) dt$$

- Q adalah matriks simetris real positif definit atau positif semidefinite
- Q menentukan error
- R adalah matriks simetri real positif definit

OPTIMALISASI

- Nilai u dimasukkan ke persamaan state

$$\dot{x} = A - BKx = (A - BK)x$$

- Diasumsikan system stabil atau $A-BK$ nilai eigennya negative, Maka dengan memasukkan u ke indeks performansi J didapatkan:

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Q x + x^* K^* R K x) dt$$

$$= \int_0^{\infty} x^* (Q + K^* R K) x dt$$

$$x^* (Q + K^* R K) x = \frac{d(x^* P x)}{dt}$$

$$x^* (Q + K^* R K) x = -x^* P x - x^* P \dot{x} = -x^* [(A - BK)^* P + P(A - BK)] x$$

- Asumsikan P adalah matriks simetris real
- $(A - BK)^* P + P(A - BK) = -(Q + K^* R K)$

- Indeks performansi menjadi

$$J = \int_0^{\infty} \mathbf{x}^* (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^* \mathbf{R} \mathbf{K}) \mathbf{x} dt = -\mathbf{x}^* \mathbf{P} \mathbf{x} \Big|_0^{\infty} = -\mathbf{x}^*(\infty) \mathbf{P} \mathbf{x}(\infty) + \mathbf{x}^*(0) \mathbf{P} \mathbf{x}(0)$$

- Karena diasumsikan $A - Bk$ stabil maka $x(\infty) = 0$

$$J = \mathbf{x}^*(0) \mathbf{P} \mathbf{x}(0)$$

- Diasumsikan T adalah matriks non singular, maka bisa ditulis $R = T^* T$ sehingga

$$(\mathbf{A}^* - \mathbf{K}^* \mathbf{B}^*) \mathbf{P} + \mathbf{P} (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K}) + \mathbf{Q} + \mathbf{K}^* \mathbf{T}^* \mathbf{T} \mathbf{K} = 0$$

$$\mathbf{A}^* \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^*)^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{P}]^* [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^*)^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{P}] - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$$

- Minimasi J maka:

$$\mathbf{x}^* [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^*)^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{P}]^* [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^*)^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{P}] \mathbf{x}$$

- Didapatkan

$$K = T^{-1}(T^*)^{-1}B^*P = R^{-1}B^*P$$

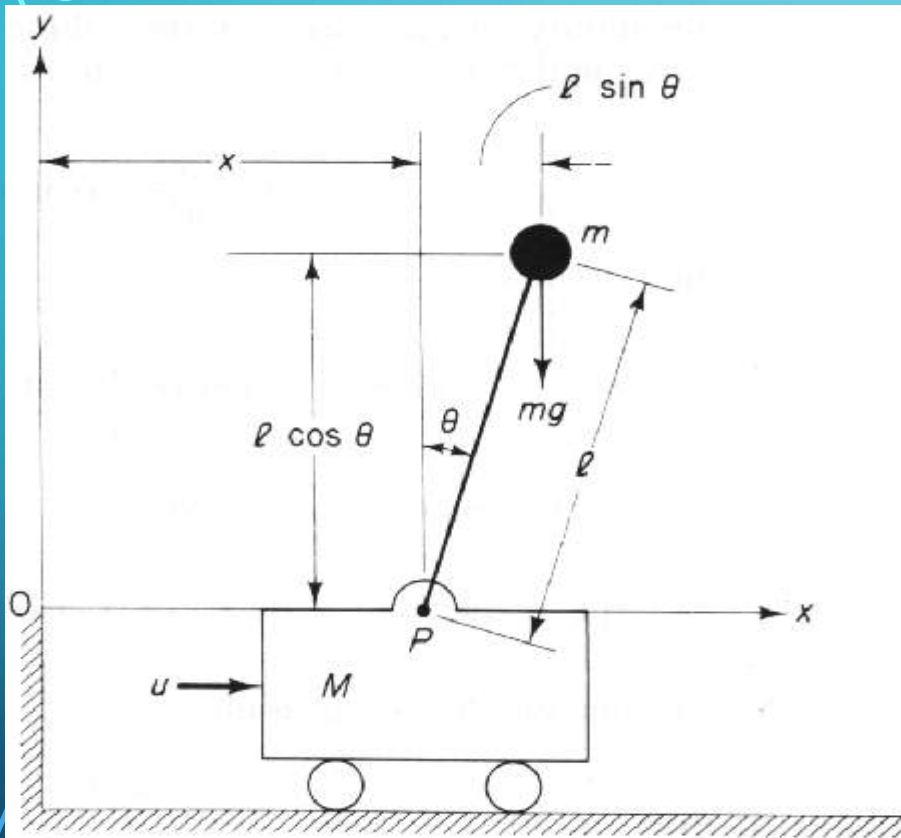
- Sehingga didapatkan control state feedbacknya adalah

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B^*Px(t)$$

$$A^*P + PA - PBR^{-1}B^*P + Q = 0$$

- Dengan P adalah dicari dengan menyelesaikan persamaan Riccati

CONTOH SIMULASI LQR PADA MATLAB



Model plant yang cukup populer adalah “Inverted Pendulum”. Inverted pendulum adalah sebuah pendulum yang terdiri dari sebuah batang dan diletakan terbalik (engselnya berada di bawah dan ujung batang di atas). Walaupun terlihat sederhana, inverted pendulum merupakan pemodelan dari peluncuran roket luar angkasa.

Persamaan inverted pendulum yang sudah dilinearisasi adalah:

$$M l d^2\theta/dt^2 = (M+m)g\theta - u$$

$$M d^2x/dt^2 = u - mg\theta$$

Dan state space-nya menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{g(M+m)}{Ml} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-mg}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Ml} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} u$$

Output yang ingin dibuat menjadi nol adalah sudut pendulum θ dan posisi pendulum x . Kriteria ini relevan dengan peluncuran roket, yakni kita menginginkan roket kita tetap mengarah tegak ke atas dan posisinya tetap pada trajektori awal. Jadi, persamaan output state space-nya:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

Dalam simulasi ini, parameter-parameter M , m , g , dan l diberi nilai:

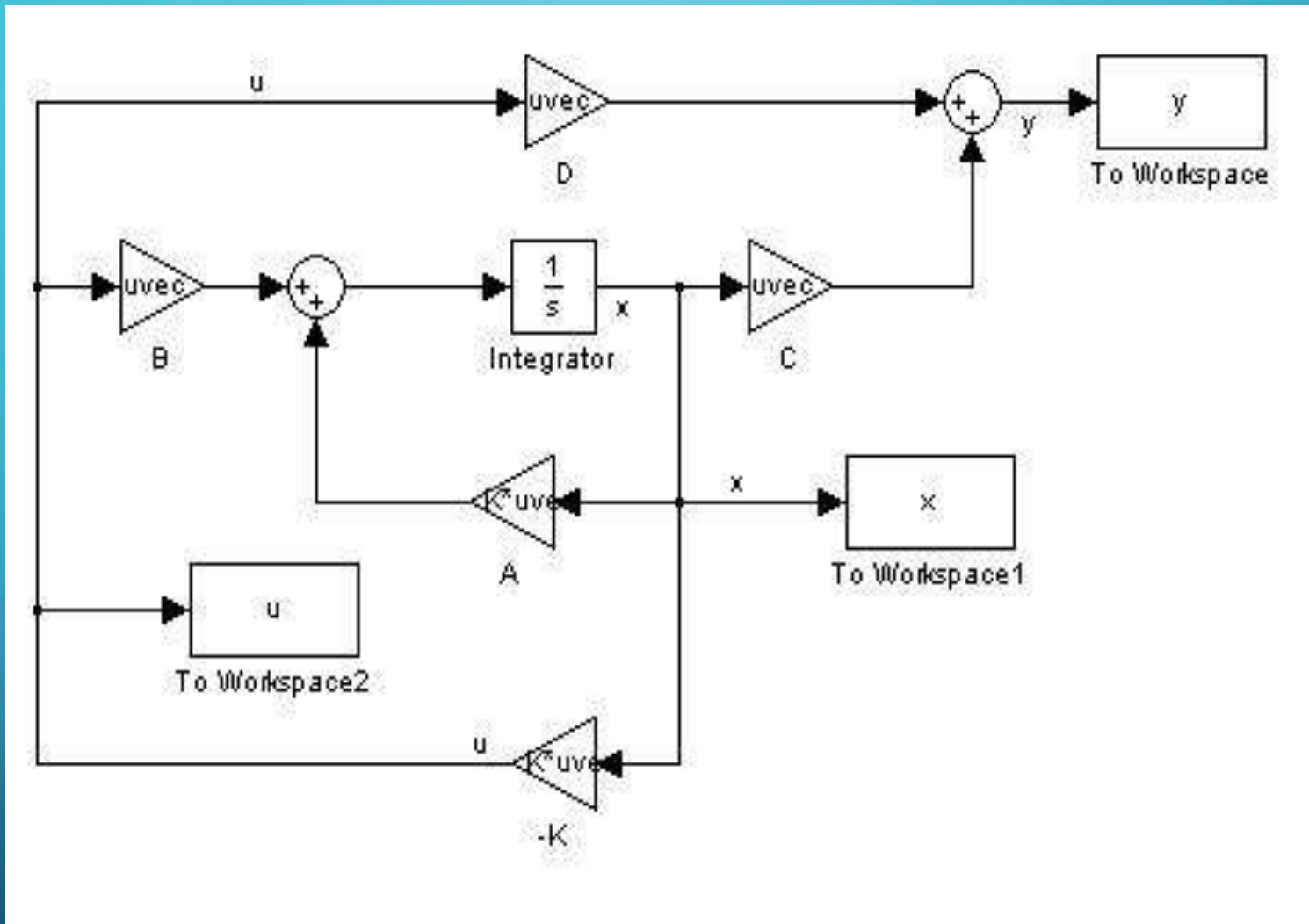
$$M = 1 \text{ kg}$$

$$m = 100 \text{ g} = 0.1 \text{ kg}$$

$$l = 1 \text{ m};$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Kemudian, persamaan state space dibangun di matlab dan disimulasikan dengan simulink. Simulasi dilakukan dengan memberi kondisi awal $\theta = 10^\circ = \pi/18$ rad. Kondisi ini bisa merepresentasikan keadaan ketika roket agak miring sedikit karena gangguan dari luar seperti angin, atau tekanan udara, atau turbulensi. LQR kemudian akan bekerja untuk mengembalikan arah roket kembali ke atas ($\theta = 0$).



Gain feedback LQR harus dibuat juga. Diawali dengan menentukan matrix R dan Q, dan menggunakan aturan Bryson. Karena model matematis ini dibuat berdasarkan linearisasi pada $\theta = 0$, maka sudut pendulum tidak boleh melewati kira-kira 10° . Jadi nilai max θ yang diperbolehkan adalah $10^\circ = \pi/18$ rad. Kemudian posisi pendulum misalkan kita batasi hingga 0.1 m dan input u (gaya yang diberikan pada kereta M) dibatasi pada 10 N. Jadi R dan Q menjadi:

$$Q = \begin{bmatrix} (18/\pi)^2 & 0 \\ 0 & (18/\pi)^2 \end{bmatrix}, R = 1/10^2$$

MENENTUKAN MATRIX Q DAN R

- Hal yang paling sering menjadi pertanyaan adalah bagaimana memperoleh/menentukan matrix Q dan R. Tidak ada solusi yang unik untuk matrix-matrix ini. Pemilihan matrix ini tergantung dari seberapa besar pengaruh y dan u yang diinginkan pada cost function dan dilakukan dengan trial and error (coba-coba). Yang perlu diperhatikan dalam proses trial and error ini adalah matrix Q dan R harus simetris dan positive definite.
- Adapun satu aturan yang bisa menjadi acuan awal dalam trial and error ini adalah Bryson's Rule. Bryson's Rule menunjukkan pemilihan matrix Q dan R dapat dimulai dengan:

$$Q = 1/\text{nilai } y^2 \text{ max yg diperbolehkan}$$

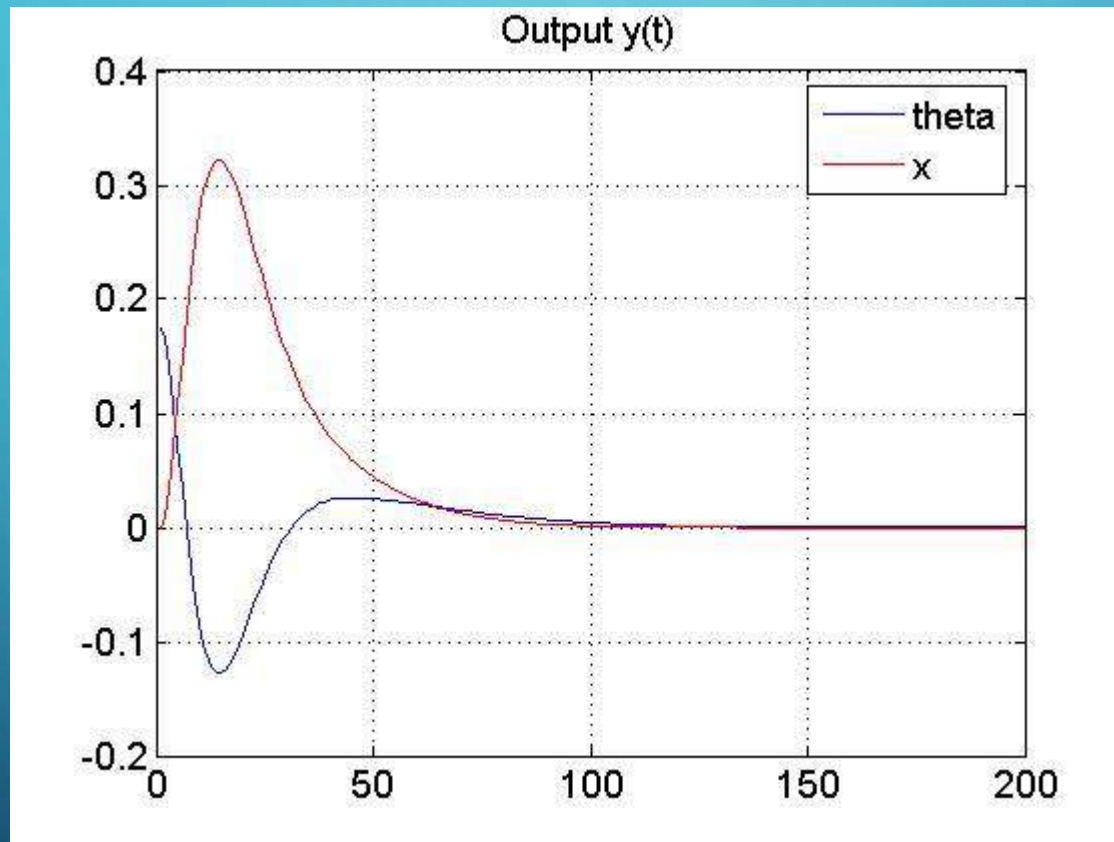
$$R = 1/\text{nilai } u^2 \text{ max yg diperbolehkan}$$

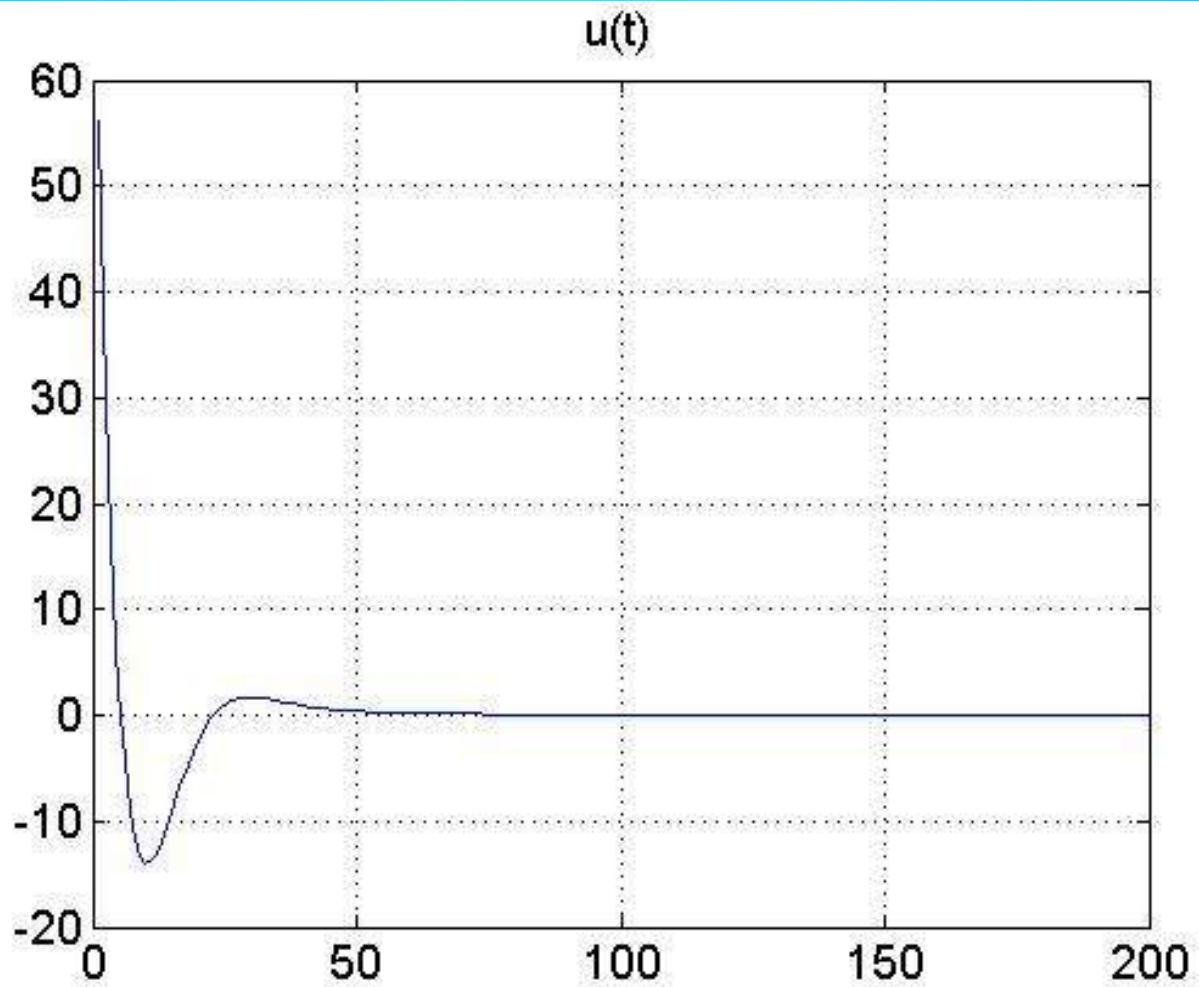
- Cara pemilihan ini tidak dijamin akan memberikan hasil yang diinginkan, tetapi setidaknya dapat menjadi langkah awal dalam proses trial and error.

MENENTUKAN MATRIX Q DAN R

Pada perancangan sistem kendali, seringkali kita harus melakukan trial and error. Contohnya pada desain PID, kita harus melakukan trial and error kepada 3 variable yang berbeda (P, I, dan D). Di sini lah LQR menjadi pilihan yang lebih baik daripada PID. Pada LQR, trial and error hanya dilakukan pada dua variable yakni **Q** dan **R**. Maka, proses trial and error pada LQR lebih sederhana tetapi tetap dapat menghasilkan performa yang sama dengan PID.

- Lalu, gain feedback dapat dihitung dengan menyelesaikan persamaan Riccati melalui fungsi `are` atau `care` dalam matlab. Setelah itu, simulasi bisa dilakukan dengan simulink dan berikut hasilnya:





- Bisa dilihat bahwa sudut θ diawali pada nilai $\pi/18 \approx 0.1745$ dan posisi $x = 0$. Kemudian LQR mengembalikan posisi $\theta = 0$. Nilai θ dan posisi x sudah sesuai dengan batasannya $\theta_{\max} = 10^\circ$ dan $x_{\max} = 1$ m, tetapi nilai u jauh melewati batasan $u_{\max} = 10$ N. Nilai u terlihat mencapai 60 N pada awal kinerja sistem. Hal ini berarti desain harus diulang dengan mengubah matrix R dan Q lagi, dan pengubahannya dilakukan secara trial and error.
- Secara umum LQR dikatakan berhasil mengendalikan inverted pendulum. Pendulum bisa dikendalikan ke posisi seimbang/menghadap ke atas. Bila diperhatikan, sistem ini tidak memiliki input reference, jadi kita tidak dapat memberikan input ke sistem. Sistem hanya bekerja untuk meregulasi dirinya sendiri dari kondisi tertentu. LQR sebenarnya bisa diaplikasikan dengan adanya input reference, dan akan dipaparkan pada pertemuan selanjutnya

REFERENSI

- ❑ Ogata, Katsuhiko. 2002. *Modern Control Engineering, 4th Edition*. Upper Saddle River NJ: Prentice-Hall, Inc.
- ❑ Burl, Jeffrey B. 1999. *Linear Optimal Control: H₂ and H[∞] Methods*. Menlo Park CA: Addison Wesley Longman.
- ❑ Hespanha, João P. 2007. *Undergraduate Lecture Notes on LQG/LQR Controller Design*. Santa Barbara CA: University of California.
- ❑ <http://www.ece.ucsb.edu/~hespanha/ece147c/web/lqrlqgnotes.pdf>. diakses 26 Juli 2010.