

**ONLINE MONITORING DAN KONTROL BESARAN TEKANAN DAN ALIRAN
PADA PROTOTYPE PERPIPAAN MINYAK DENGAN MENGGUNAKAN
LINEARQUADRATIC REGULATOR PADA NETWORKED CONTROL SYSTEM**

**(ONLINE MONITORING AND CONTROL OF PRESSURE AND FLOW IN
PROTOTYPE OIL PIPELINE SYSTEM USING LINEAR-QUADRATIC REGULATOR
IN NETWORKED CONTROL SYSTEM)**

Muhammad Yusril Fadliansyah¹, Erwin Susanto², Muhammad Ridho Rosa³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

myfadliansyah@student.telkomuniversity.ac.id¹, erwinelektro@telkomuniversity.ac.id²,
mridhorosa@telkomuniversity.ac.id³

ABSTRAK

Selama kurun waktu 1989-2015 terdapat sebanyak 17 kasus pencemaran minyak yang terjadi di perairan cilacap, 4 kasus akibat kebocoran pipa dan pada tahun 2019 terdapat kasus kebocoran pipa di sumur pengeboran lepas pantai YYA-1 milik PT. Pertamina Hulu Energi Karawang yang di sebabkan oleh anomali tekanan pada saat pengeboran ulang sumur. Banyak cara untuk meningkatkan efisiensi pada industri pertambangan minyak. Kendali dan *monitoring* pada jarak jauh merupakan salah satu dari cara untuk meningkatkan efisiensi. *Valve* memiliki berbagai macam jenis salah satunya *Gate Valve*. Linear-Quadratic Regulator merupakan salah satu metode kendali *state space* yang memerlukan informasi dari keseluruhan sistem. Untuk mencapai nilai *gain* optimal maka perlu melakukan pembobotan untuk nilai Q dan R pada LQR. Pada tugas akhir kali ini telah dirancang sistem kendali menggunakan metode Linear-Quadratic Regulator yang akan diterapkan pada *Networked Control System*, dimana komunikasi menggunakan Bluetooth serta *valve* yang digerakan oleh *stepper motor*. Hasil penelitian pada tugas akhir kali ini yaitu memperoleh sistem yang dapat mengendalikan *flow* air sesuai dengan *set point* serta dapat memantau *pressure* dan *flow* pada *pipeline system* secara nirkabel. Daerah kerja pada sistem kali ini yaitu dari rentang 0.00007 m³/s sampai dengan 0.00021 m³/s.

Kata Kunci: LQR, Pipeline, Networked Control System, Pressure, dan Flow.

ABSTRACT

During the period 1989-2015 there were as many as 17 cases of oil cooking that occurred in cilacap waters, 4 cases due to pipeline leaks and in 2019 there were cases of pipeline leaks in pt. Pertamina Hulu Energi Karawang caused by pressure anomalies at the time of drilling the well. There are many ways to increase efficiency in the oil mining industry. Remote control and monitoring is one way to increase efficiency. Valve has various types of one of which is Gate Valve. Linear-Quadratic regulator is a method of state space control that requires information from the entire system. To achieve the optimal gain value, it is necessary to weigh for the Q and R values in LQR. In this final project has been designed the control system using metode Linear-Quadratic Regulator that will be applied to the Networked Control System, where communication using Bluetooth and valves driven by the motor stepper. The results of the research on the final task this time is to obtain a system that can control water flow in accordance with the set point and can monitor pressure and flow on the pipeline system wirelessly. The working area of the system this time is from the range of 0.00007 m³/s to 0.00021 m³/s.

Keywords: LQR, Pipeline, Networked Control System, Pressure, and Flow.

PENDAHULUAN

Dunia sekarang sedang menghadapi perkembangan industry ke-4 atau yang lebih dikenal

4.0. Berdasarkan analisis McKinsey Global Institute, industri 4.0 memberikan dampak yang sangat besar dan luas, terutama pada sektor lapangan kerja, di mana robot dan mesin akan menghilangkan banyak

lapangan kerja didunia[1], terutama juga di bidang industri pertambangan minyak.

Pada industri pertambangan minyak terdapat masalah seperti kebocoran minyak. Selama kurun waktu 1989-2015 terdapat sebanyak 17 kasus pencemaran minyak yang terjadi di perairan cilacap, 4 kasus akibat kebocoran pipa[2]. Pada tahun 2019 terdapat kasus kebocoran pipa di sumur pengeboran lepas pantai YYA-1 milik PT. Pertamina Hulu Energi Karawang yang di sebabkan oleh anomali tekanan pada saat pengeboran ulang sumur[3], sehingga dapat mencemari lingkungan. Maka dari itu dibutuhkan sistem yang bisa memantau dan mengendalikan debit aliran serta besaran tekanan, dengan diterapkannya NCS pada sistem ini maka akan meningkatkan efisiensi serta menawarkan solusi baru pada industri perminyakan. Oleh karena itu, dibutuhkannya suatu sistem kendali tidak langsung yang bisa memantau dan mengendalikan besaran *flow* serta *pressure* pada pipa agar bisa diatur sesuai dengan set point yang diinginkan. Selain itu, agar bisa membantu untuk meningkatkan produktivitas kerja pada industri pertambangan minyak untuk bisa menemukan solusi baru. Dengan sistem kendali ini kita bisa mengukur serta mengendalikan besaran *flow* dan *pressure* pada pipa secara tidak langsung. Metode pada sistem ini menggunakan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dipadukan dengan *microcontroller*, diharapkan bisa untuk mengendalikan kecepatan dan bukaan dari *Valve* agar sesuai dengan *set point*.

METODE PENELITIAN

Konsep metode penelitian yang dilakukan antara lain yaitu studi literatur, identifikasi masalah dan motivasi, penentuan fokus dari penelitian, perancangan dan pengembangan solusi, pembuatan simulasi, pengujian, pembahasan, pengambilan kesimpulan. Berdasarkan konsep tersebut, penjabaran metode yang digunakan berdasarkan tahapan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi dilakukan terhadap jurnal penelitian, skripsi dan buku-buku teori pendukung nasional dan internasional.
2. Identifikasi Masalah dan Motivasi Melakukan identifikasi masalah yang ada terutama pada prototipe pemantauan yang pernah dibangun oleh peneliti sebelumnya.
3. Penentuan Fokus dari Penelitian Ditentukan dari hasil identifikasi masalah dan motivasi yang mendorong dilakukannya penelitian.
4. Perancangan dan Pembuatan Perangkat Membuat dan merancang perangkat keras dan perangkat lunak.
5. Demonstrasi

Merancang demonstrasi untuk menguji prototipe yang dibuat.

6. Pengujian
Pengujian terhadap prototipe dilakukan untuk dievaluasi.
7. Analisis
Membuat analisis terhadap hasil pengujian yang didapatkan.
8. Pelaporan Temuan Penelitian Menyimpulkan hasil penelitian alat.

PERANCANGAN SISTEM

Perancangan sistem menjelaskan tentang perancangan alat pada penelitian tugas akhir ini. Pada tugas akhir kali ini akan dirancang desain sistem untuk mengendalikan dan memantau besaran *pressure* dan *flow* pada pipa. *Water flow sensor*, *pressure transmitter* dan *pressure gauge* digunakan untuk mengukur besaran *pressure* dan *flow*. Data akan dikirim ke MATLAB dengan modul Bluetooth sebagai alat komunikasi antara *microcontroller* dan MATLAB.

Fluida merupakan suatu zat yang dapat mengalir. Fluida juga mencakup zat cair dan zat gas seperti udara dapat mengalir[7]. Zat cair dapat dikelompokkan menjadi fluida karena sifatnya yang mengalir dari suatu tempat ke tempat lain. Air, minyak, pelumas, dan susu merupakan contoh zat cair[7]. Fluida memperlihatkan fenomena sebagai zat yang terus menerus berubah bentuk apabila mengalami tegangan geser, dengan kata lain yang dikategorikan sebagai fluida adalah suatu zat yang tidak mampu menahan tekanan geser tanpa berubah bentuk[8]. Dapat disimpulkan fluida dapat berubah bentuk dengan mudah tergantung pada tempat fluida tersebut berada.

Volume fluida yang dikeluarkan tiap detiknya disebut Debit aliran. Debit aliran digunakan untuk menghitung kecepatan aliran pada pipa[8].

Dirumuskan dengan Persamaan berikut:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Dimana:

Q = debit (m^3/s)
V = volume fluida (m^3)
t = waktu fluida mengalir (s)

Aliran air secara garis besar dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Aliran tunak (*steady*)

Aliran yang kecepatannya tidak dipengaruhi oleh perubahan waktu sehingga pada setiap titik konstan (tidak mempunyai percepatan).

2. Aliran seragam (*uniform*)

Aliran yang tidak terjadi perubahan baik arah maupun besar sehingga tidak terjadi perubahan penampang lintasan dan kecepatan.

3. Aliran tidak tunak (*unsteady*)

Aliran yang terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu.

4. Aliran tidak seragam (*non uniform*)

Aliran yang berubah baik kecepatan maupun penampang.

Efek *Water Hammer* atau juga disebut *hydraulic shock* adalah fenomena dimana terjadi lonjakan tekanan yang disebabkan oleh pembukaan dan penutupan katup yang cepat. Penutupan katup yang tiba-tiba dapat menyebabkan kebocoran pada pipa. Kasus *water hammer* tersebut terjadi di pipa *blowdown* di salah satu PLTU di Indonesia[9]. Peningkatan head tekanan yang terjadi akibat penutupan katup tiba-tiba dapat ditentukan dengan Persamaan Joukowsky [10]:

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V$$

Dimana:

ΔH = perubahan gelombang yang dihasilkan dari gelombang sentakan a = kecepatan gelombang (m/s) g = kecepatan gravitasi (m/s²) ΔV = perubahan tiba-tiba dari kecepatan (m/s)

Persamaan diatas mewakili generasi, perambatan, refleksi, dan pelemahan gelombang tekanan yang terjadi pada system perpipaan. Keseimbangan massa energi di bagian pipa memberikan sistem Persamaan diferensial sebagai berikut[11]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \frac{c^2 \partial Q}{gA \partial z}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = -Ag \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{fQ|Q|}{2DA}$$

Dimana:

t = time coordinate (s)

z = space coordinate (m)

H = pressure head (m)

c = speed of sound (m/s)

g = acceleration of gravity (m/s²)

Q = flow rate in the pipe [m³/s]

D = diameter pipa [m]

A = cross-sectional area of the pipe [m²]

f = coefficient of friction [non-dimensional]

Sensor Tekanan merupakan salah satu jenis dari banyaknya sensor. Sensor Tekanan adalah sensor yang digunakan untuk mengukur tekanan dari

suatu zat. Tekanan adalah satuan fisika untuk menyatakan gaya per satuan luas. Satuan tekanan yang sering digunakan untuk mengukur nilai dari suatu cairan atau gas, yang dapat dirumuskan sebagai berikut[12]:

$$P = \frac{F}{A}$$

Dimana:

P = Tekanan

F = Gaya

A = Luas

Satuan Tekanan adalah Pascal (Pa) yang dapat dihubungkan dengan satuan volume dan suhu, yang mana semakin tinggi tekanan pada suatu tempat dengan isi yang sama, maka suhu akan semakin tinggi. Prinsip kerja Pressure Transmitter sama seperti Pressure Gauge. Dimana perubahan tekanan yang dideteksi oleh tabung Bourdon dapat menyebabkan tabunya bergerak. Kemudian gerakan tersebut ditransmisikan untuk menggerakkan jarum meter[12]. Pada pengerjaan tugas akhir kali ini dilakukan konversi dari satuan Pascal ke satuan bar kemudian ke satuan Pressure Head.

Sensor debit air merupakan alat untuk mendeteksi laju debit fluida. Water flow sensor terdiri dari kincir, rotor air, dan sensor Hall Effect. Biasanya sensor debit digunakan dalam flow meter atau aliran logger untuk merekam debit cairan. Prinsip kerja sensor ini adalah dengan memanfaatkan fenomena Hall Effect. Hall Effect didasarkan pada efek medan magnet terhadap partikel yang bergerak. Ketika ada arus listrik yang mengalir pada device Hall Effect yang di tempatkan pada medan magnet yang arahnya tegak lurus arus listrik. Medan listrik yang terus membesar mengakibatkan gaya Lorentz yang bekerja pada partikel menjadi nol[13]. Fluida yang mengalir pada sensor mengakibatkan kincir di dalam sensor berputar. Medan magnet tersebut akan dikonversikan oleh Hall Effect menjadi pulsa. Semakin cepat debit yang masuk, maka semakin cepat juga kincir berputar. Sinyal pulsa berupa square wave sederhana yang sangat mudah di konversi ke Liter per menit menggunakan formula Pulse Frequency (Hz)/7.5 = Flow Rate in L/m. Pada pengerjaan tugas akhir kali ini satuan L/m akan dikonversi menjadi m³/s.

Networked Control System merupakan sistem kendali yang melibatkan jaringan komunikasi sebagai bagian dari lingkaran kendali[4]. Komunikasi antar sensor, aktuator, dan controller terjadi pada jaringan komunikasi digital, dengan kata lain komunikasi dapat dilakukan dengan jarak jauh dan terhubung jaringan. Terdapat keuntungan dari penggunaan NCS seperti fleksibilitas yang tinggi dibandingkan sistem kontrol tradisional dan juga terdapat beberapa masalah utama dari Networked

Control System. Dari survey yang telah dilakukan oleh Joaõ P. Hespanha pada tahun 2007, menurutnya terdapat beberapa masalah sebagai berikut:

1. Band-limited Channels yang terbatas yang diakibatkan oleh sinyal perintah yang banyak
2. Sampling dan Delay yang disebabkan oleh jaringan komunikasi
3. Packet Dropout disebabkan oleh kemungkinan data yang hilang pada jaringan
4. Arsitektur sistem yang cukup rumit

Model state space yang paling umum yang digunakan untuk mewakili sistem waktu delay adalah

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - d(t))$$

Dimana $d(t)$ adalah time delay dalam keadaan $x(t)$, dimana $0 \leq d(t) \leq \bar{d} < \infty, d(t) \leq \tau < \infty$.

Linear Quadratic Regulator (LQR) merupakan metode perancangan sistem kendali modern yang keluarannya berupa *state feedback*. LQR memerlukan informasi keseluruhan *state* pada perancangannya. Pada umumnya LQR memiliki dinamika sistem sebagai berikut[14]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad t = 1, 2, \dots, n.$$

Dimana :

- x = State pada waktu t
- u = Input pada waktu t
- y = Output pada waktu t
- A = Dynamics matrix
- B = Input matrix
- C = Output Matrix

Tujuan LQR adalah membuat keluaran y menjadi nol dengan *cost function* seminimal mungkin. Cost function adalah waktu integral dari bentuk kuadratis pada vector keadaan x dan vektor input u seperti pada Persamaan[14]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt$$

Dimana Q adalah matriks simetris, semidefinit positif dan R adalah matriks simetris, definit positif. Dari Persamaan (2-10) dapat dikatakan bahwa suatu matriks A yang memiliki ukuran $n \times n$ semi definit positif, jika setiap vector $x \neq 0$ dengan n komponen berlaku $x^T A x \geq 0$, dan dikatakan definit positif, jika $x^T A x > 0$. Untuk mencari K pada LQR harus melakukan pembobotan untuk nilai Q dan R .

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$Q_n$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & R_n \end{bmatrix}$$

Bentuk dari sinyal kendali adalah $u = -Kx$ dengan K adalah matriks umpan balik yang didapat dari penyelesaian persamaan aljabar Ricatti. Kendala penggunaan metode LQR salah satunya adalah penyelesaian persamaan Ricatti yang lumayan sulit jika dikerjakan secara manual. Maka dari itu, dibutuhkan bantuan *software* pada computer seperti MATLAB. Jika elemen matriks K yang tidak diketahui ditentukan sedemikian rupa, maka $u = -Kx$ optimal untuk syarat awal $x(0)$.

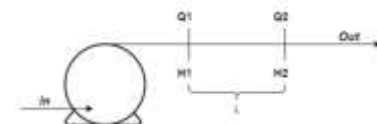
Dari indeks persamaan keadaan sistem dan indeks peformansi didapat nilai matriks K yang optimal untuk indeks peformansi yang dipilih sebagai[14]:

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

Dengan P adalah unik (penyelesaian yang bersifat tunggal). Solusi semi-definit positif untuk persamaan Ricatti harus memenuhi Persamaan tereduksi sebagai berikut[14]:

$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0$ Persamaan diatas disebut persamaan Ricatti. Dalam perancangan kendali optimal LQR, setelah matriks P diketahui, maka nilai P tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan (2-9) sehingga didapat nilai matriks optimal K [14]. LQR memerlukan informasi keseluruhan *state* pada perancangannya, alternatif jika syarat model tidak terpenuhi adalah menggunakan *Integral Action* pada *outer loop*, yang berguna untuk memberikan nol *error steady state*. Sinyal *error* digunakan pengendali untuk menghitung integral dari sinyal *error*, kemudian didapat *feedback* dengan sistem *augmenting* dengan model *state*:

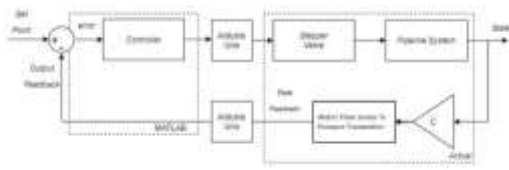
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax + Bu \\ y - r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax + Bu \\ Cx - r \end{bmatrix}$$



Gambar 1. Pipeline System

Pada tugas akhir kali ini akan dirancang desain sistem untuk mengendalikan dan memantau besaran *pressure* dan *flow* pada pipa. *Water flow sensor*, *pressure transmitter* dan *pressure gauge* digunakan untuk mengukur besaran *pressure* dan *flow*. Data akan dikirim

ke MATLAB dengan modul Bluetooth sebagai alat komunikasi antara *microcontroller* dan MATLAB.

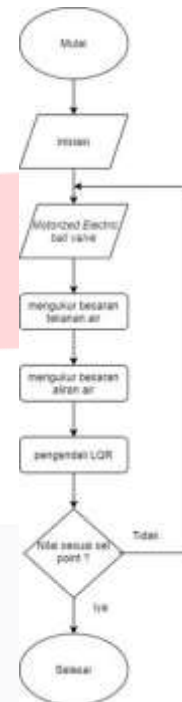


Gambar 2. Diagram Blok

Berikut ini adalah penjelasan dari tugas akhir kali ini, sebagai berikut:

1. Pompa yang mengalirkan air dari tanki air ke pipa.
2. Arduino Uno sebagai *Microcontroller* untuk mengolah data dari sensor dan untuk mengatur *step* dari *Stepper Motor*
3. *Water Flow Sensor* untuk membaca data *flow* dengan besaran [m^3/s] pada pipa.
4. *Pressure Transmitter* untuk membaca data *pressure* dengan besaran (bar) pada pipa.
5. *Stepper Motor* yang disambungkan dengan valve agar dapat diatur sudut buka sesuai yang diinginkan.
6. MATLAB mengendalikan *microcontroller master* melalui.
7. Modul Bluetooth HC-05 sebagai alat komunikasi antara MATLAB dan Arduino Uno.

FLOWCHART



Gambar 2. Flowchart

Pada gambar 3-9 diatas di jelaskan bahwa proses bekerja ketika setelah inisiasi pompa menghisap air dan mengalirkannya di dalam pipa. Setelah itu besaran tekanan dan aliran air diukur kemudian diolah oleh kontroler. Pengendali LQR kemudian mengendalikan besaran bukaan pada *Stepper valve*, kemudian nilai akan dihitung apakah sesuai *set point* atau tidak. Jika iya, sistem akan berhenti bekerja dan jika tidak, sistem akan terus looping hingga nilai sesuai dengan *set point* yang ditentukan.

Pengujian Sensor Pressure Transmitter

Pada sub bab kali ini akan dilakukan pengujian sensor *Pressure Transmitter*. Tujuan pengujian kali ini untuk mengetahui nilai dan tingkat akurasi pembacaan sensor *pressure transmitter*.

Tabel 1 Pengujian Pressure Transmitter

Nilai Pressure (bar)	Nilai rata-rata sensor (bar)	Nilai ratarata error(%)
0.2	0.277142857	38,57
1	1.096122449	9.6
2	2.196938776	9.8

Dari data tabel diatas pada pressure gauge dengan nilai 0.2, 1, dan 2 bar didapat nilai *error* = 38.57%, 9.6%, dan 9.8% dengan nilai akurasi rata rata 80.67%

Pengujian Sensor Water Flow

Pada sub bab kali ini akan dilakukan pengujian sensor *Water Flow*. Tujuan pengujian kali ini yaitu untuk mengetahui nilai dan tingkat akurasi pembacaan sensor *water flow*.

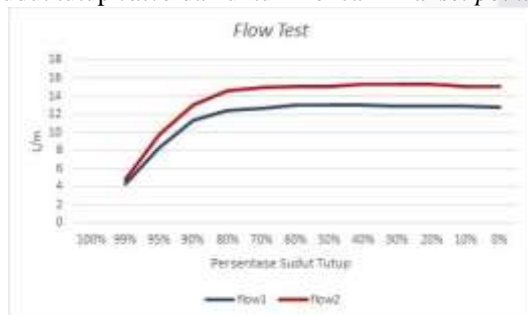


Gambar 3 Pengujian sensor Water Flow

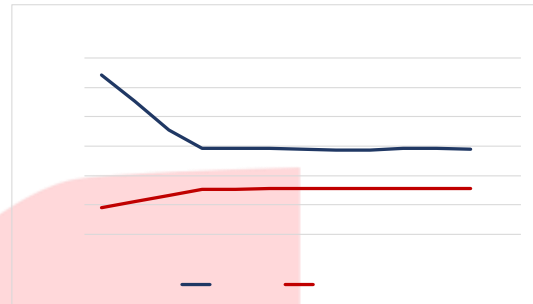
Dari gambar 4-1 dapat dilihat bahwa *flow 1* mendapat nilai rata-rata sebesar 0.24175 L/s dan nilai rata-rata *flow 2* sebesar 0.23375 L/s maka didapat nilai error untuk *flow 1* sebesar 0.074% dan *flow 2* sebesar 0.038% . Nilai akurasi *flow 1* sebesar $99,26\%$ dan *flow 2* sebesar $99,96\%$.

Pengujian besaran sudut Valve terhadap Flow dan Pressure

Pada sub bab kali ini akan dilakukan pengujian sudut valve terhadap *flow* dan *pressure*. Tujuan pengujian ini untuk menentukan daerah kerja kontrol pada sudut tutup valve dan untuk mencari nilai *set point*.



Gambar 4 Hasil pengujian sudut buka valve terhadap flow

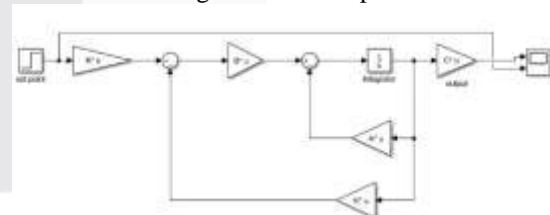


Gambar 5 hasil pengujian sudut buka valve terhadap pressure

Pada hasil pengujian diatas dapat dilihat pada rentang 0% sampai dengan 70% tidak ada perubahan yang signifikan, sedangkan pada rentang 80% sampai dengan 99% terdapat perubahan yang cukup signifikan. Dapat ditentukan daerah kerja untuk sudut tutup pada rentang 80% sampai dengan 99% . Fungsi daridaerah kerja adalah sebagai rentang untuk menentukan *set point* pada kendali.

Simulasi LQR Pada Simulink

Pada pengujian kali ini dilakukan dengan merangkai simulasi LQR pada simulink untuk melihat hasil dan nilai dari simulasi. Simulasi LQR pada Simulink mulai dari merangkai blok-blok pada Simulink

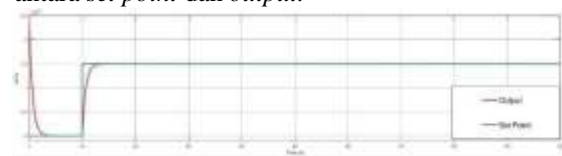


Gambar 6 Rangkaian simulasi LQR pada simulink

Dengan nilai set point $0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$ didapat dari daerah kerja *Stepper Motor*, nilai A, B, C didapat dari persamaan (3.2), nilai *running time* sebesar 100

detik serta nilai pembobotan $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ dan $R =$

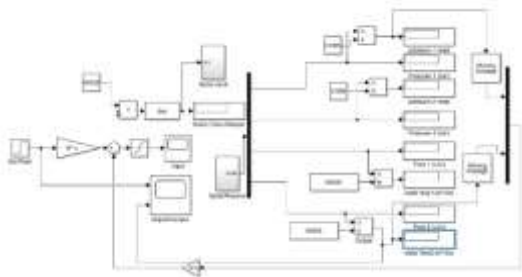
10000000 maka didapat Nilai $N = 1.00489446194691$ dan nilai $K = [0.000316165532963 \quad -0.094145518651575]$. Pada gambar 4-5 diperoleh hasil simulasi perbandingan antara *set point* dan *output*.



Gambar 7 Hasil simulasi LQR Implementasi LQR pada alat di Simulink

Pada pengujian kali ini dilakukan dengan cara memasukkan nilai K yang didapat dari pengujian simulasi. Diawali dengan merangkai blok pada simulink. Pengujian ini dilakukan dengan cara yaitu dengan pengujian nilai K yang didapat dari hasil simulasi.

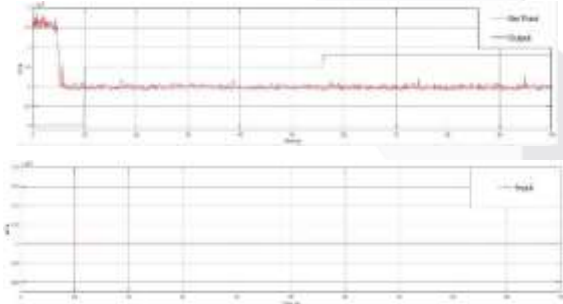
Gambar 8 Rangkaian Implementasi LQR di



Simulink

Pengujian kali ini dilakukan dengan nilai set point = 0.00015 serta nilai $N = 1.004894461946910$ dan nilai $K = [0.000316165532963 \quad -0.094145518651575]$ dengan rentang waktu sebesar 100 detik. yang didapat dari hasil simulasi LQR dengan daerah rentang daerah kerja $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$ sampai $0.00021 \text{ m}^3/\text{s}$.

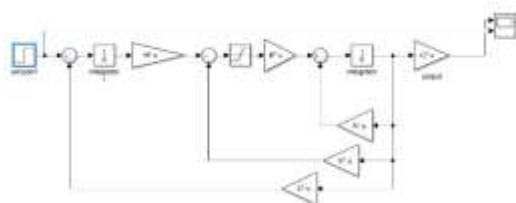
Gambar 9 Hasil Implementasi LQR



Gambar 10 Hasil Input Implementasi LQR Dari hasil analisis gambar diatas dapat dilihat bahwa input tertahan *output* tidak *tracking* mendekati *set point*, *output* tertahan dibawah set point sedangkan nilai *input* tertahan pada $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$.

Simulasi LQR Integral Action Pada Simulink

Pada pengujian kali ini dilakukan dengan merangkai simulasi LQR Integral Action pada simulink untuk melihat hasil dan nilai dari simulasi. Simulasi LQR pada Simulink mulai dari merangkai blok-blok pada Simulink



Gambar 11 Rangkaian Simulasi LQR-I pada Simulink Dengan nilai set point $0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$ didapat dari daerah kerja

Stepper Motor, nilai A, B, C didapat dari persamaan (3.3), dengan nilai nilai

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

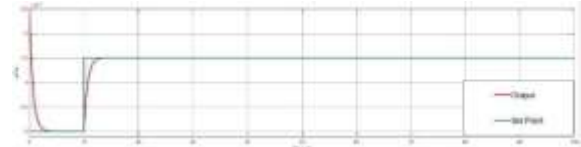
pembobotan $Q = [0 \quad 1 \quad 0]$ dan $R = 1000$, maka

$$\text{didapat nilai } K = [0.031622772840499 \quad 0.673525006907651 \quad 0.031622776601678]$$

dengan K_3 sebagai nilai N. Pada pengujian kali ini dijalankan dengan running time sebesar 2000 detik. Pada gambar 4-11 diperoleh hasil simulasi perbandingan antara set point dan output.

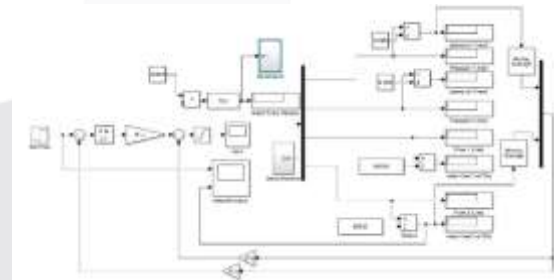
Gambar 12 Hasil Simulasi LQR-I

Implementasi LQR Integral Action pada alat di



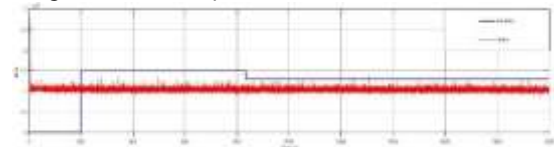
Simulink

Pada pengujian kali ini dilakukan dengan cara memasukkan nilai K yang didapat dari pengujian simulasi. Diawali dengan merangkai blok pada simulink

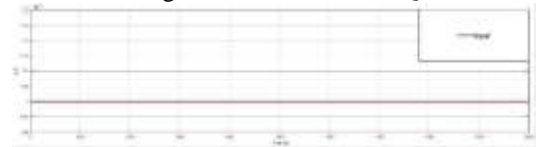


Gambar 13 Rangkaian Implementasi LQR-I pada simulink

Pengujian kali ini dilakukan dengan nilai set point = 0.00015 serta nilai $K = [0.031622772840499 \quad 0.673525006907651 \quad 0.031622776601678]$ dengan K_3 sebagai N dengan rentang waktu sebesar 2000 detik dan daerah kerja $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$ sampai dengan $0.00021 \text{ m}^3/\text{s}$.



Gambar 14 Hasil Implementasi LQR-I sesuai dengan nilai K simulasi LQR-I



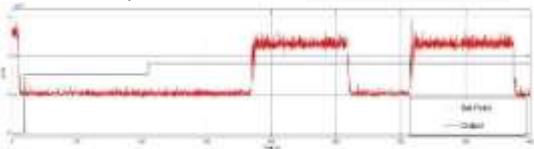
Gambar 15 Nilai Input Implementasi LQR-I sesuai dengan nilai K simulasi LQR-I

Pada implementasi LQR-I dengan nilai nilai K =

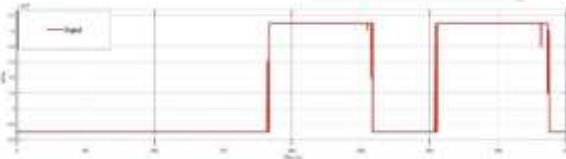
[0.031622772840499 -0.673525006907651 0.031622776601678] dengan K_3 sebagai N, maka dapat dilihat bahwa *output* belum dapat *tracking* mengikuti *set point* dengan nilai $0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0.00018 \text{ m}^3/\text{s}$, serta nilai *input* yang tertahan di $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$.

Implementasi LQR-I dengan Nilai K sesuai Simulasi LQR dan N=1

Pada pengujian kali ini dilakukan dengan mengubah nilai $N = 1$ dengan set point sebesar $0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$, dengan nilai sesuai simulasi LQR pada pengujian 4.4 dimana nilai $K = [0.000316165532963 -0.094145518651575]$ dengan *running time* 2000 detik dan daerah kerja dari rentang $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$ sampai dengan $0.00021 \text{ m}^3/\text{s}$.



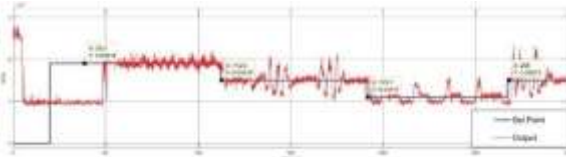
Gambar 16 Hasil implementasi LQR-I dengan nilai K sesuai simulasi LQR dan N=1



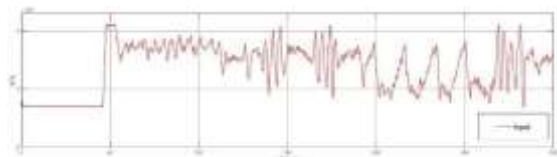
Gambar 17 Nilai Input Implementasi LQR-I dengan nilai K sesuai simulasi LQR dan N=1 Pada pengujian kali ini dengan nilai $K = [0.000316165532963 -0.094145518651575]$ dan nilai $N = 1$, dapat dilihat bahwa *output* sudah mulai bergerak dan *input* yang tidak tertahan pada nilai $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$.

Implementasi LQR-I dengan Nilai K trial error

Dari pengujian 4.7.4 telah didapat pergerakan dari *output* dan *input*. Pada pengujian dilakukan dengan memberi nilai K trial error menjadi $[-0.000012 \ 0.05]$ dan nilai $N = 1$ dengan waktu selama 400 detik.



Gambar 18 Hasil Implementasi LQR-I dengan Nilai K trial error



Gambar 19 Hasil input Implementasi LQR-U dengan nilai K trial error

Tabel 2 Tabel Analisis Performansi Pengujian

Titik	Set Point	% OS	Settling Time
1	$0.00019 \text{ m}^3/\text{s}$	21.05%	40 S
2	$0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$	29.73%	16 S
3	$0.00011 \text{ m}^3/\text{s}$	39.27%	15 S
4	$0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$	44.6%	14 S

Pada gambar 4-16 dapat dilihat bahwa input sudah tidak tertahan di nilai $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$, dan pada 4-15 dapat dilihat bahwa *output* baru merespon *set point* pada 50 detik, sistem *tracking* mengikuti set point yang di beri nilai $0.00017 \text{ m}^3/\text{s}$, kemudian pada detik ke- 120 set point diubah ke $0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$ dan terlihat bahwa *output* ada di sekitar $0.00015 \text{ m}^3/\text{s}$. Pada detik ke- 220 set point diubah ke $0.00013 \text{ m}^3/\text{s}$ dan *output* sistem di sekitar $0.00013 \text{ m}^3/\text{s}$.

KESIMPULAN

Dari hasil-hasil pengujian dan pembahasan didapat kesimpulan dari Tugas Akhir ini sebagai berikut.

1. Telah dirancang sebuah alat untuk memantau dan mengendalikan besaran aliran dan tekanan pada sistem perpipaan dengan MATLAB Simulink sebagai pengirim perintah kendali ke Arduino Uno menggunakan komunikasi Bluetooth oleh Modul Bluetooth HC-05.
2. Pada pengujian sensor transmitter terdapat nilai akurasi sebesar 84.93%, pengujian sensor *water flow* 1 dan sensor *water flow* 2 terdapat nilai akurasi sebesar 99.26% dan 99.96%
3. Implementasi simulasi LQR pada pipeline system tidak dapat tracking mencapai nilai yang diinginkan, dengan pembobotan nilai $Q = [1 \ 0 \ 0 \ 1]$ dan $R = 10.000.000$ didapatkan hasil yang tidak bagus dan bisa disimpulkan bahwa LQR tidak mendapat seluruh informasi dari state dan model matematis yang kurang tepat.

4. Telah dirancang sistem kendali flow dengan LQR Integral Action output sistem dapat tracking ke set point dengan daerah kerja $0.00007 \text{ m}^3/\text{s}$ sampai $0.00021 \text{ m}^3/\text{s}$.

SARAN

Beberapa saran yang diberikan untuk pengembangan selanjutnya pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Tentukan desain pemodelan matematis yang tepat.
2. Pilih valve yang sesuai dengan kebutuhan
3. Desain actuator dengan valve harus lebih tepat
4. Perbanyak riset dan *trial error* sebelum melakukan penelitian

REFERENSI

- [1] V. E. Satya, "Kajian Singkat Terhadap Isu Aktual Dan Strategis Strategi Indonesia Menghadapi Industri 4.0," *Pus. Penelit. Badan Keahlian DPR RI*, vol. X, no. 09, p. 19, 2018.
- [2] M. Wibowo, "Pemodelan Sebaran Pencemaran Tumpahan Minyak di Perairan Cilacap," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 19, no. 2, p. 191, 2018, doi: 10.29122/jtl.v19i2.2812.
- [3] A. Phady *et al.*, "Kajian Teknologi Penanganan Kebocoran Pipa Pada Bangunan Lepas Pantai di Laut Utara Karawang," *SENSISTEK Ris. Sains dan Teknol. Kelaut.*, vol. 2, pp. 58–63, 2019, [Online]. Available: <https://journal.unhas.ac.id/index.php/SENSISTEK/article/view/13218>. [4] X. H. Ji, "A survey of recent results in networked systems analysis and design," *2010 Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2010*, vol. 95, no. 1, pp. 1931–1935, 2010, doi: 10.1109/CCDC.2010.5498780.
- [5] B. W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems," no. February, 2001.
- [6] E. B. Priyanka, C. Maheswari, and B. Meenakshipriya, "Parameter monitoring and control during petrol transportation using PLC based PID controller," *Rev. Mex. Trastor. Aliment.*, vol. 14, no. 2, pp. 125–131, 2018, doi: 10.1016/j.jart.2016.03.004.
- [7] K. Abidin and S. Wagiani, "Studi Analisis Perbandingan Kecepatanaliran Air Melalui Pipa Venturi Dengan Perbedaan Diameter Pipa," *J. Din.*, vol. 04, no. 1, pp. 62–78, 2013.
- [8] E. S. Priyanto, "ANALISA ALIRAN FLUIDA PADA PIPA ACRYLIC DIAMETER 12,7 MM (0,5 INCI) DAN 38,1 MM (1,5 INCI)," pp. 1–14, 2008.
- [9] P. Mahardhika, S. Shipbuilding, and S. Polytechnic, "Penerapan metode time history untuk fenomena water hammer," no. September, 2019, doi: 10.35991/jtm.v1i2.432.
- [10] M. Suarda, "Kajian eksperimental pengaruh tabung udara pada head tekanan pompa hidram," vol. 2, no. 1, 2008.
- [11] M. Guillén, J. Dulhoste, G. Besancon, R. S. Study, O. F. A. Flow, and M. For, "STUDY OF A FLOW MODEL FOR DETECTION AND LOCATION OF LEAKS AND OBSTRUCTIONS IN PIPES M Guillén, J-F Dulhoste, Gildas Besancon, R Santos To cite this version : HAL Id : hal-00728678," 2012.
- [12] B. Segara and C. Adeline, "MAKALAH PRESSURE SENSOR," 2016.
- [13] K. T. T. Siregar, T. Tamba, and B. Peranginangin, "Viskosimeter Digital Menggunakan Water Flow Sensor G1 / 2 Berbasis Mikrokontroler 8535."
- [14] H. Purnawan and J. Matematika, "DESAIN SISTEM KENDALI LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) UNTUK KESTABILAN TERBANG LSU-05," 2015.
- [15] S. Supriyadi, A. Burhanudin, Y. Setiyoadi, and I. B. Setyono, "Analisis Kinerja Ventilator Mekanis Dengan Pengerak Motor Stepper Berbasis Arduino," *Semin. Nas. Has. Penelit.*, pp. 662–677, 2020.
- [16] Surinto, "Rancang Bangun Mesin Cnc Milling 5 Axis Berbasis Microcontroller Mach 3 Breakout Board Dan Microstep Motor Driver Controller Tb6600," 2020.
- [17] P. Studi and P. Teknik, "RANCANG BANGUN MAGNETIC DOOR LOCK MENGGUNAKAN KEYPAD DAN SOLENOID BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO UNO," vol. 12, no. 1, pp. 39–48, 2013.