

TUGAS AKHIR

KARAKTERISASI ALAT PENGUKURAN TORSI DENGAN MENGUNAKAN SENSOR STRAIN GAUGE XY-2



Vinsensius Christian Ferry

NPM: 2016720001

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI DAN SAINS
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
2021

FINAL PROJECT

**CHARACTERIZATION OF TORQUE MEASUREMENT TOOL
USING STRAIN GAUGE SENSOR XY-2**



Vinsensius Christian Ferry

NPM: 2016720001

**DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY AND SCIENCES
PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

KARAKTERISASI ALAT PENGUKURAN TORSI DENGAN MENGUNAKAN SENSOR STRAIN GAUGE XY-2

Vinsensius Christian Ferry

NPM: 2016720001

Bandung, 15 Februari 2021

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Pembimbing 1
Philips Nicolas Gunawidjaja, Ph.D.

Pembimbing Pendamping



Pembimbing 2
Janto Vincent Sulungbudi, S.Si.

Ketua Tim Penguji



Penguji 1
Janto Vincent Sulungbudi, S.Si.

Anggota Tim Penguji



Penguji 2
Reinard Primulando, Ph.D.

Mengetahui,

Ketua Program Studi



Reinard Primulando, Ph.D.

PERNYATAAN

Dengan ini saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul:

KARAKTERISASI ALAT PENGUKURAN TORSI DENGAN MENGUNAKAN SENSOR STRAIN GAUGE XY-2

adalah benar-benar karya saya sendiri, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Atas pernyataan ini, saya siap menanggung segala risiko dan sanksi yang dijatuhkan kepada saya, apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini.

Dinyatakan di Bandung,
Tanggal 15 Februari 2021



Vinsensius Christian Ferry
NPM: 2016720001

ABSTRAK

Torsi merupakan salah satu besaran fisis yang sebanding antara perkalian lengan beban dengan gaya yang diterapkan. Konsep torsi dapat dipakai pada bidang geoteknik terutama pada metode *vane shear test*, pengujian untuk menentukan kuat pergeseran tanah. Salah satu sensor yang digunakan untuk mengukur torsi pada saat metode *vane shear test* adalah *strain gauge* XY-2 yang dipasangkan pada bagian tengah *probe* dengan jumlah dua buah dan dirangkai menjadi jembatan Wheatstone. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan karakteristik dari dua *probe* yang telah dipasangkan *strain gauge* XY-2 yang berupa akurasi, presisi, histresis, *non-repeatability*, resolusi, dan *range* pengukuran. Kalibrasi pada penelitian ini menggunakan beban 13 kg sebagai beban maksimum. Pengukuran torsi dilakukan dengan cara memasang beban mulai dari 1 kg hingga 10 kg pada ujung lengan pada model pengukuran torsi. Hasil pengukuran torsi didapatkan dari pembacaan *torquemeter* sebagai referensi utama dan *input* nilai torsi ke *smartphone* agar *probe* tersebut terkalibrasi. Karakteristik pada *probe* pertama dan kedua memiliki persentase *error* antara pengukuran torsi melalui *torquemeter* dengan perhitungan torsi secara teori sebesar 1%. Histresis pada *probe* pertama sebesar 10%. Presisi sebesar 0,1%. *Non-repeatability* sebesar 2%. *Range* pengukuran torsi adalah 104,9 N·m.

Kata-kata kunci: Aplikasi VST, deformasi, ESP32, jembatan Wheatstone, karakterisasi, *strain gauge*, torsi

ABSTRACT

Torque is a physical quantity that is proportional to the multiplication of the load arm and the force applied. The concept of torsion can be applied in the geotechnical field, especially in the vane shear test method, a test to determine the shear strength of the soil. One of the sensors used to measure torque during the vane shear test method is strain gauge XY-2 which is attached to the center of the probe in two pieces and assembled into a Wheatstone bridge. This study aims to find the characteristics of the two probe XY-2 strain gauge which are accuracy, precision, hysteresis, non-repeatability, resolution, and range measurements. The calibration in this study uses a load of 13 kg as the maximum load. Torque measurement is done by attaching loads from 1 kg to 10 kg at the end of the arm in the torque measurement model. The torque measurement results are obtained from the reading of torquemeter as the main reference and input the torque value to smartphone so that probe is calibrated. The characteristics of the first and second probe have the percentage error between the torque measurement via the torquemeter and the theoretical torque calculation of 1 %. Historical first probe is 10 %. The precision is 0.1%. Non-repeatability by 2 %. Range of torque measurement is 104.9 N·m.

Keywords: VST application, deformation, ESP32, Wheatstone bridge, characterization, *strain gauge*, torque

*Kepada kedua orang tua, adik, tante, dan orang-orang yang
dikasihi penulis.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat dan senantiasanya membimbing penulis dari awal memasuki perkuliahan hingga menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “Karakterisasi Alat Pengukuran Torsi dengan Menggunakan Sensor Strain Gauge XY-2”. Selama empat tahun lebih penulis berkuliah di Fisika Universitas Katolik Parahyangan, banyak ilmu dan pengalaman berharga yang penulis dapatkan. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, nasihat, dan arahan yang bermanfaat bagi penulis. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Philips Nicolas Gunawidjaja, Ph.D., selaku dosen pembimbing utama yang telah membimbing penulis dari segi penulisan dan diskusi mengenai isi skripsi ini. Terimakasih telah mengingatkan penulis untuk selalu bertemu untuk membahas penulisan yang telah penulis lakukan.
2. Bapak Drs.Janto Vincent Sulungbudi, selaku dosen pembimbing serta yang telah membimbing penulis dari pembuatan alat ukur yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini dengan kesabaran atas segala ketidakmampuan, kekurangan, dan keanehan penulis. Terimakasih telah memberikan pelajaran atau nilai hidup yang berharga dalam proses penyelesaian tugas akhir ini pada penulis.
3. Ibu Sylvia Hastuti Sutanto, Ph.D., selaku dosen wali penulis yang telah memberikan ilmu-ilmunya, semangat, dan nasihat kepada penulis.
4. Bapak Reinard Primulando, Ph.D., Bapak Haryanto M. Siahaan, Ph.D., Bapak Paulus C. Tjiang, Ph.D., Bapak Aloysius Rusli, Ph.D., Ibu Risti Suryantari, M.Sc., dan Ibu Flaviana, S.Si, M.T., yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan pengajaran selama penulis berkuliah.
5. Rekan-rekan Laboran (Ka Putri, Oethree, Julia, dan Rika) yang telah memberikan semangat dan nasihat kepada penulis. Terimakasih juga telah bergurau bersama dan bercerita tentang keluh kesah yang dialami.
6. Teman-teman angkatan 2016 dan teman-teman Fisika lainnya yang telah berdiskusi, bergurau, dan memberikan dukungan serta berjuang bersama penulis.
7. Ka Arifin dan Ka Michael yang telah memberikan suntikan moral dan berdiskusi mengenai mata kuliah yang penulis tidak kuasai.
8. PT. Yureka Hasta Pratisthana yang telah memberikan waktu, tempat, dan kesempatan untuk melakukan penelitian tugas akhir ini. Terimakasih telah berdiskusi dan memberikan wawasan baru mengenai topik skripsi penulis ini.
9. Keluarga penulis, terimakasih telah mendengarkan keluh kesah dan memberikan suntikan moril maupun materi kepada penulis. Semoga kedepannya penulis bisa mewujudkan cita-cita yang diharapkan oleh keluarga.

10. Jimmy Sanjaya dan keluarga yang telah memberikan tempat dan waktu untuk menyelesaikan penulisan tugas akhir ini. Terimakasih atas cerita pengalaman hidup yang berharga sehingga penulis dapat terinspirasi untuk lebih baik.
11. Kepada mereka yang tak belum disebutkan satu per satu, terimakasih atas kebaikan yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Diri sendiri, yang telah mau berjuang dan berusaha bangkit dari kegagalan hingga mengalami jalan buntu untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Terimakasih sudah berjuang hingga saat ini.

Akhir kata, penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Penulis pun merasa banyak kekurangan yang terdapat pada tugas akhir ini sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun akan penulis terima demi kesempurnaan dari tulisan dan penelitian ini.

Bandung, Februari 2021

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Pembahasan	3
2 LANDASAN TEORI	5
2.1 Sifat Mekanik Bahan	5
2.1.1 Regangan	5
2.1.2 Tegangan	5
2.1.3 Hubungan antara tegangan dan regangan	6
2.2 Torsi	7
2.3 <i>Torquemeter</i>	8
2.4 <i>Probe VST</i>	9
2.5 <i>Strain Gauge</i>	10
2.6 Jembatan Wheatstone	12
2.7 <i>Operational Amplifier</i>	14
2.8 HX711	15
2.9 ESP32	16
2.10 Bluetooth	16
2.11 App Inventor	17
3 METODE PENELITIAN	19
3.1 Mempersiapkan <i>probe VST</i>	20
3.2 Pemasangan Rangkaian Elektronik untuk Kalibrasi <i>probe VST</i>	21
3.3 Pembuatan Aplikasi Android	22
3.4 Pembuatan dan Proses <i>Compile</i> Program ESP32	27
3.5 Kalibrasi <i>Probe VST</i> dan Pengukuran Torsi	28
4 ANALISIS DATA HASIL PENGUKURAN	33
4.1 Analisis Data Hasil Kalibrasi	33
4.2 Hasil Pengukuran Torsi dengan Menggunakan Beban 1 kg hingga 10 kg	34
5 KESIMPULAN DAN SARAN	39

5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran	39
DAFTAR REFERENSI	41
A KODE PROGRAM	43

DAFTAR GAMBAR

1.1	Rangkaian <i>Strain Gauge Full Bridge</i>	2
2.1	Pada gambar A persegi panjang berada pada keadaan awal dengan panjang l_0 dan pada gambar B setelah diberikan gaya mengalami regangan sehingga pertambahan panjang sebesar Δl	5
2.2	Pada gambar (a) tabung ditarik sehingga mengalami pertambahan panjang sebesar ΔL dan titik (b) tabung ditekan sehingga mengalami kontraksi panjang.	6
2.3	Batas-batas kurva tegangan terhadap <i>regangan</i> . Sepanjang garis A daerah elastis, titik B adalah tegangan luluh atau objek mulai bersifat plastis, sepanjang titik C kekuatan maksimum, dan titik D adalah titik patah.	7
2.4	Model untuk kalibrasi dan pengukuran torsi.	8
2.5	Referensi utama pengukuran torsi menggunakan <i>Torquemeter digital</i> DTA4-350A.	8
2.6	<i>Probe</i> VST.	9
2.7	Penyebab diberikan torsi pada <i>strain gauge</i> XY-2.	9
2.8	Penyebab diberikan gaya sehingga terjadi perubahan hambatan pada <i>strain gauge</i>	11
2.9	<i>Strain gauge</i> tipe XY-2.	11
2.10	Contoh rangkaian dengan jembatan Wheatstone.	12
2.11	Rangkaian <i>strain gauge half-bridge</i>	13
2.12	Rangkaian <i>strain gauge full-bridge</i>	13
2.13	Konfigurasi <i>operational amplifier non-inverting</i>	14
2.14	Hubungan antara <i>load cell</i> , HX711, dan ESP32.	15
2.15	Modul ESP WROOM 32.	16
2.16	Contoh Tampilan antarmuka App Inventor.	17
2.17	Contoh balok-balok perintah yang digunakan pada App Inventor.	18
3.1	Gambaran umum yang dilakukan pada tugas akhir ini.	19
3.2	Pemasangan <i>strain gauge</i> XY-2 pada kedua sisi <i>probe</i>	21
3.3	Rangkaian elektronik yang terdiri atas sambungan jembatan Wheatstone pada <i>probe</i> dan ESP32 yang dihubungkan pada HX711 IC.	22
3.4	Konfigurasi sambungan antara ESP dengan <i>smartphone</i>	22
3.5	Tampilan antarmuka aplikasi VST pada alamat https://appinventor.mit.edu/	23
3.6	Balok program untuk pengaturan awal.	24
3.7	Balok program untuk koneksi Bluetooth.	24
3.8	Balok program untuk menghubungkan aplikasi ke ESP32.	25
3.9	Balok program untuk memasukkan nilai faktor kalibrasi.	25
3.10	Balok program untuk menyimpan nilai faktor kalibrasi.	25
3.11	Balok program untuk mengaktifkan komponen Clock2.	26
3.12	Balok program Clock2 untuk mengambil data pengukuran torsi.	27
3.13	Balok program untuk mengirimkan data hasil pengukuran torsi.	27
3.14	<i>Set up</i> pengukuran torsi pada penelitian ini.	29
3.15	Hasil yang ditampilkan oleh torquemeter dan VST pada keadaan mula-mula.	29
3.16	Keadaan <i>probe</i> yang sedang dikalibrasi dan hasil kalibrasi pada <i>torquemeter</i> dan aplikasi.	30

3.17	Sketsa perhitungan torsi secara teori.	31
4.1	Grafik <i>error bar</i> hasil kalibrasi <i>probe</i> pertama dan <i>probe</i> kedua dengan Menggunakan Beban 0 kg dan 13 kg.	34
4.2	Grafik <i>error bar</i> pengukuran torsi pada <i>probe</i> Pertama dan <i>probe</i> kedua dengan menggunakan beban 1 - 10 kg.	35
4.3	Contoh perhitungan torsi secara teori dengan menggunakan beban 3 kg.	36

DAFTAR TABEL

3.1	Fitur-fitur yang digunakan pada aplikasi VST.	23
4.1	Kalibrasi Probe 1 dengan Menggunakan Beban 0 kg dan 13 kg.	33
4.2	Kalibrasi Probe 2 dengan Menggunakan Beban 13 kg.	33
4.3	Hasil pengukuran torsi pada <i>probe</i> 1 dengan menggunakan beban 1 - 10 kg.	34
4.4	Hasil pengukuran torsi pada <i>probe</i> 2 dengan menggunakan beban 1 - 10 kg.	34

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

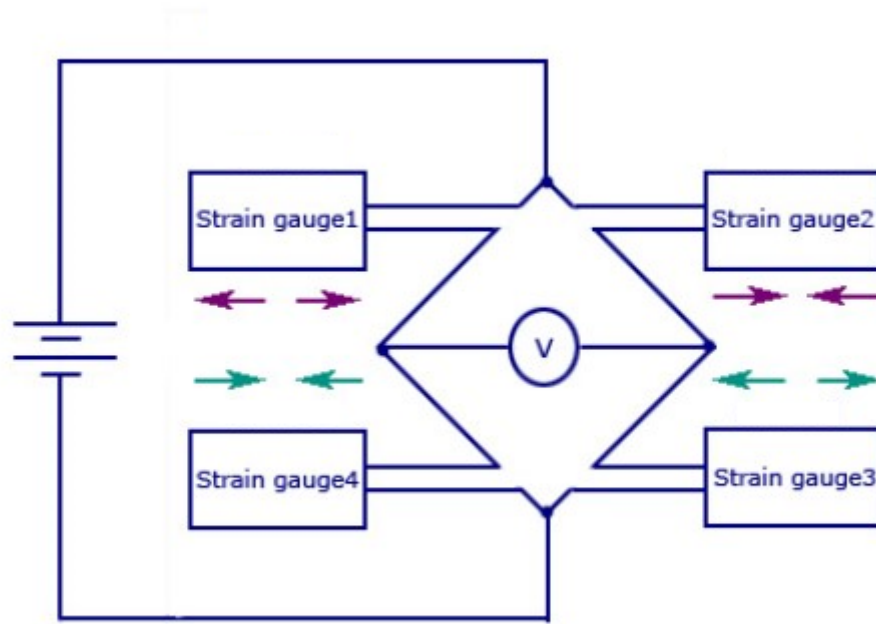
Salah satu besaran fisis yang dapat diukur dari suatu objek adalah torsi, yang sebanding antara perkalian lengan beban dengan gaya yang diterapkan [1]. Penerapan torsi dalam kehidupan sehari-hari ditemukan pada bidang geoteknik. Bidang ini mengenalkan beberapa metode untuk mencari kuat pergeseran tanah, salah satu metode yang digunakan adalah *vane shear test* (VST). *Vane shear test* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk pengujian terhadap viskositas tanah dan mengukur kekuatan pergeseran tanah pada daerah yang tidak memiliki resapan air dari tanah kohesif, tanah yang mempunyai sifat saling melekat pada butir-butirnya yang dapat ditemukan pada tanah liat [2].

Penggunaan VST pada kehidupan sehari-hari, misalnya dalam membantu mengembangkan pedoman untuk mengembangkan fondasi bangunan. Karena setiap tanah memiliki kemiringan yang beragam sehingga dalam proses pembangunan diperlukan letak kemiringan tanah yang sesuai agar fondasi bangunan dapat berdiri dengan kokoh. Keuntungan menggunakan *vane shear test* adalah sebagai metode pengujian yang ideal untuk mendapatkan hasil kekuatan pergeseran tanah pada daerah yang tidak memiliki resapan air, dapat mengetahui sensitivitas tanah, dan pengujian kekuatan pergeseran tanah pada kedalaman tanah yang sangat dalam [3].

Probe yang digunakan pada penelitian ini, merupakan dua buah *strain gauge* yang telah dipasang pada sebuah silinder logam. Saat *probe* diberikan torsi, regangan yang dialami *probe* akan mengubah resistansi pada *strain gauge*.

Agar dapat dilakukan pengukuran torsi secara teratur, dua buah *strain gauge* dirangkai menjadi jembatan Wheatstone seperti pada Gambar 1.1 dan *probe* tersebut diatur menjadi rangkaian pengukuran torsi yang terdiri atas kotak penghubung *torquemeter* dan lengan beban. Jembatan Wheatstone menghasilkan *output* sangat kecil (mV). Oleh karena itu, penelitian tugas akhir ini perlu menggunakan amplifikasi berupa HX711 dimana terdapat op-amp *non-inverting* yang telah terintegrasi dengan *gain* yang telah terprogram. Kemudian, *probe* tersebut dihubungkan dengan HX711 dan ESP 32, salah satu perangkat keras berupa mikrokontroler yang digunakan untuk menghubungkan *smartphone* dan dapat diprogram dengan menggunakan bahasa pemrograman C [4]. Dengan demikian, pengukuran torsi dapat dilakukan dan diperoleh melalui aplikasi VST pada *smartphone* yang telah terhubung dengan ESP32 melalui jaringan secara nirkabel berupa *Bluetooth Low Energy* (BLE). Aplikasi VST yang digunakan pada penelitian ini dibuat menggunakan App Inventor, suatu *Integrated Development Environment* (IDE) untuk membuat aplikasi pada *smartphone* yang berbasis *website*.

Tujuan utama pada penelitian tugas akhir ini adalah mendapatkan karakterisasi dari kedua *probe* yang tersusun dua buah sensor *strain gauge* XY-2 pada bagian tengah *probe* dan mendapatkan pengukuran torsi dalam tahapan kalibrasi. Karakterisasi yang dimaksud berupa sensitivitas, *cakupan*



Gambar 1.1: Rangkaian *Strain Gauge Full Bridge*.

pengukuran torsi, dan resolusi pengukuran torsi. Ketika *probe* tersebut diberi tekanan maka *strain gauge* mengalami *strain* dan *stress* sehingga mengubah resistansi pada *strain gauge*.

Karakterisasi pada alat ukur dapat berupa akurasi, presisi, *range*, dan resolusi. Akurasi merupakan seberapa besar kesalahan antara nilai nyata (perhitungan secara teori) dengan nilai yang terukur. Akurasi dapat dihitung melalui rasio antara selisih mutlak nilai nyata dan nilai terukur terhadap nilai nyata. Presisi adalah seberapa dekat nilai-nilai pengukuran antara satu dengan yang lainnya dalam suatu pengukuran berulang. Presisi pada alat ukur bergantung pada ketidakpastian. Resolusi adalah perubahan terkecil yang dapat diukur melalui sensor maupun proses. *Range* adalah nilai maksimum dan nilai minimum dari parameter yang akan diukur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, penelitian dilakukan dengan cara menghubungkan antara *probe* VST dengan *smartphone*. Kemudian, dilakukan kalibrasi dan karakterisasi *probe* VST yang bertujuan untuk menentukan konsistensi dari pengukuran torsi pada *probe* VST sehingga didapatkan hasil karakterisasi berupa grafik linear dari pembacaan torsi pada aplikasi terhadap torquemeter dari tiga *probe* yang digunakan. Selain itu, karakterisasi untuk masing-masing *probe* yang digunakan berupa sensitivitas, *cakupan* pengukuran torsi, dan resolusi pengukuran torsi.

Berikut adalah rumusan masalah pada penelitian ini.

1. Bagaimana cara menempatkan *strain gauge* pada *probe* VST?
2. Bagaimana cara membentuk rangkaian elektronik pada *probe* VST sehingga terhubung dengan *smartphone*?
3. Bagaimana cara mengkalibrasi *probe* VST?

4. Bagaimana cara interpretasi hasil karakterisasi *probe* VST?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini untuk mengetahui penempatan *strain gauge* pada *probe* yang digunakan, cara membentuk rangkaian elektronik hingga terhubung dengan *smartphone*, mengkalibrasi *probe* VST, dan cara mendapatkan hasil karakterisasi dari kedua *probe* VST tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah pengukuran torsi dengan menggunakan dua buah *strain gauge* yang terpasang pada kedua sisi permukaan *probe* yang dirangkai menjadi jembatan Wheatstone. Hasil tegangan *output* yang didapatkan dari rangkaian jembatan Wheatstone ini sangat kecil (mV) sehingga perlu menggunakan penguat signal dengan HX711 yang terdapat fungsi mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital. Dengan menggunakan HX711 yang dihubungkan dengan ESP32 dan dapat terhubung aplikasi pada *smartphone* sehingga didapatkan hasil pengukuran torsi yang dapat dibandingkan dengan referensi utama yakni pembacaan *torquemeter* dan perhitungan secara teori. Untuk mendapatkan hasil perbandingan antara *torquemeter*, perhitungan torsi secara teori, dan hasil pengukuran torsi pada aplikasi diperlukan kalibrasi *probe* terlebih dahulu. Penelitian tugas akhir ini berlangsung di laboratorium sehingga hasil yang didapatkan berupa pengukuran torsi, perbandingan hasil torsi dengan beban, dan karakterisasi untuk kedua *probe* yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil karakterisasi pada masing-masing *probe* berupa akurasi, presisi, resolusi, dan *range*.

1.5 Metodologi

Penelitian pada tugas akhir ini dilakukan secara eksperimen. Mula-mula, dua buah *strain gauge* XY-2 dipasangkan pada permukaan *probe* VST pada masing-masing sisi dan dirangkai menjadi jembatan Wheatstone. Kemudian, *probe* disambungkan dengan rangkaian elektronik yang terdiri atas ESP32 dan HX711-IC serta dihubungkan dengan *torquemeter* pada kotak pengukuran torsi. *Probe* VST yang telah dihubungkan dengan HX711IC dan ESP32 mendapatkan hasil eksperimen yang didapatkan berupa pengukuran torsi. Proses kalibrasi dilakukan dengan cara memasang beban 13 kg pada ujung lengan beban dan memberi *input* hasil torsi yang ditunjukkan pada *torquemeter* tersebut dimasukkan pada aplikasi VST dan fitur *save* dan *calibrate* pun ditekan pada tampilan aplikasi sehingga *probe* yang digunakan telah dikalibrasi. Setelah mengkalibrasi, melakukan pengukuran torsi pada beban dari 1 kg hingga 10 kg dengan tiga kali pengukuran. Dengan demikian, hasil torsi yang telah didapatkan digunakan untuk membandingkan hasil antara perhitungan torsi secara teori dengan hasil torsi dari *torquemeter* sehingga dapat digunakan untuk mengetahui konsistensi dan karakteristik dari kedua *probe* yang digunakan.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi menjadi lima bagian, antara lain:

1. Bab 1 Pendahuluan, terdiri dari latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, metodologi, dan sistematika penulisan dari tugas akhir ini.
2. Bab 2 Dasar Teori, berisi tentang dasar-dasar teori yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini.

3. Bab 3 Metode Penelitian, meliputi proses melakukan eksperimen yang terdiri dari cara mempersiapkan *probe*, pemasangan rangkaian elektronik untuk mengkalibrasi *probe* dan pengukuran torsi, pembuatan aplikasi Android, pembuatan dan proses mengkompilasi program ESP32, dan mengkalibrasi *probe* serta pengukuran torsi.
4. Bab 4 Hasil dan Pembahasan, membahas hasil kalibrasi, hasil pengukuran torsi, perbandingan antara hasil perhitungan torsi secara teori, *torquemeter*, dan pengukuran torsi melalui aplikasi VST, dan karakterisasi *probe*.
5. Bab 5 Penutup, terdiri dari kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil dan analisis yang diperoleh, serta saran-saran yang dapat diberikan mengenai metode penelitian agar dapat mengembangkan penelitian ini.