

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN IMPEDANSI
PADA QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE DENGAN
FREKUENSI 10 MHZ MENGGUNAKAN MODUL
PIC32MX460F512L**

SKRIPSI

Oleh :

Esa Rossiarthato Noor Akbar

145090800111004



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**

repository.ub.ac.id

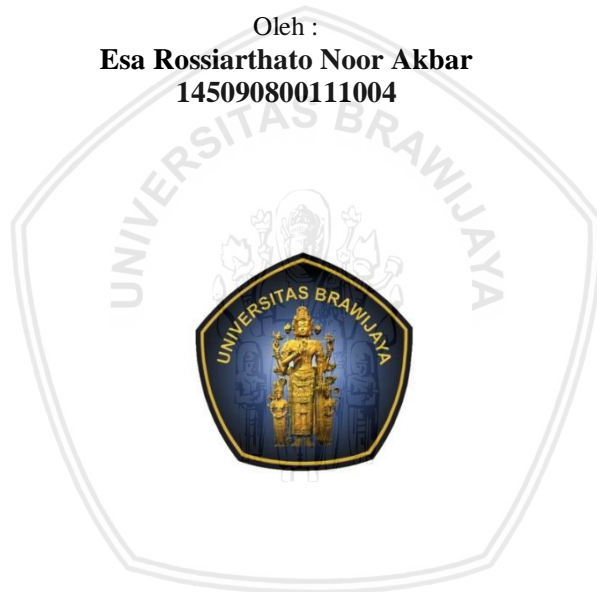
**RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN IMPEDANSI
PADA QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE DENGAN
FREKUENSI 10 MHZ MENGGUNAKAN MODUL
PIC32MX460F512L**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Oleh :

Esa Rossiarthato Noor Akbar
145090800111004



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



LEMBAR PENGESAHAN

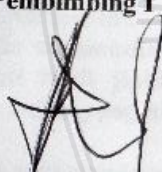
RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN IMPEDANSI
PADA QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE DENGAN
FREKUENSI 10 MHZ MENGGUNAKAN MODUL
PIC32MX460F512L

Oleh :

Esa Rossiarthato Noor Akbar
145090800111004

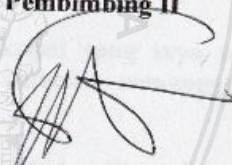
Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal **28 DEC 2018**
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Pembimbing I



Prof. Dr.-Ing. Setyawan P. Sakti
NIP. 196508251990021001

Pembimbing II



Dr. Eng. Agus Naba, S.Si., M.T.
NIP. 197208061995121001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya



Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda
NIP. 196409101990021001



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Esa Rossiarthato Noor Akbar
NIM : 145090800111004
Prodi / Jurusan : Instrumentasi / Fisika
Penulis Skripsi berjudul :

RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN IMPEDANSI PADA QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE DENGAN FREKUENSI 10 MHZ MENGGUNAKAN MODUL PIC32MX460F512L

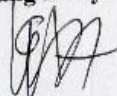
Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Skripsi ini.
2. Apabila dikemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 30 November 2018

Yang menyatakan



(Esa Rossiarthato Noor Akbar)

145090800111004



repository.ub.ac.id

RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN IMPEDANSI PADA QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE DENGAN FREKUENSI 10 MHZ MENGGUNAKAN MODUL PIC32MX460F512L

ABSTRAK

Di era modern ini terdapat bermacam-macam alat pengukur besaran fisika. Salah satunya adalah alat pengukur bernama *impedance analyzer* yang digunakan sebagai pengukuran impedansi. Dalam tugas akhir ini, metode yang digunakan adalah metode I-V untuk mengukur nilai impedansinya. Tegangan *device under test* (DUT) pada rangkaian yang diketahui diukur dan dibandingkan dengan sinyal input yang dibeikan oleh sinyal sinusoidal. *Phase* dan *gain* pada DUT dibandingkan dengan sinyal *input* menggunakan AD8302. AD8302 memberikan tegangan pada beda fase dan *gain* dari DUT. Dua tegangan *output* tersebut diumpankan ke *port analog to digital* (ADC) yang terdapat dimikrokontroler PIC32MX460f512L. Pengukuran beda fase dan *gain* pada frekuensi yang telah ditentukan dikirim menuju komputer untuk diproses lebih lanjut. Dalam penelitian ini, sebuah sensor *Quartz Crystal Microbalance* (QCM) digunakan sebagai perangkat sampel yang akan diukur. Dibandingkan dengan Bode 100 *impedance analyzer*, sistem pengukuran ini menunjukkan bahwa hasil yang baik dalam pengukuran frekuensi pada impedansi minimum (frekuensi resonansi seri dari QCM). Namun, nilai impedansi yang diukur memiliki perbedaan yang besar, terutama pada impedansi yang jauh dari frekuensi resonansi serinya.

Kata kunci: Impedansi, *impedance analyzer*, metode I-V



repository.ub.ac.id

IMPEDANCE MEASUREMENT SYSTEM FOR QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE AROUND 10 MHZ USING PIC32MX460F512L MODULE

ABSTRACT

In modern era there are many measuring instruments for physical quantities. One of the existing measuring instruments is an impedance analyzer used to measure impedance. In this work, the I-V method to measure the impedance value was used. The voltage of the device under test (DUT) in a known circuit was measured and compared to the input signal at a given sinusoidal signal. The phase and gain of the DUT compared to the input signal using the AD8302. The AD8302 gave voltages for both phase difference and gain of the DUT. Both of the output voltage was feed into the analog to digital (ADC) port of the PIC32MX460F512L microcontroller. The measured phase difference and gain at a given frequency was sent to the computer for further processing. In this work, a Quartz Crystal Microbalance (QCM) sensor was used as a sample device to be measured. Comparing to the Bode 100 Impedance analyzer, the system showed a good agreement in the frequency measurement at minimum impedance (series resonance frequency of the QCM). However, the measured impedance values have a big difference, especially at the impedance far from the series resonance frequency.

Keywords: Impedance, impedance analyzer, I-V method



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirahim,

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Tuhan semesta alam yang tidak pernah berhenti memberikan beribu nikmat-Nya. Maha Suci Allah SWT yang telah mempermudah segala urusan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Pengukuran Impedansi pada Quartz Crystal Microbalance dengan Frekuensi 10 Mhz Menggunakan Modul PIC32MX460F512L”. Penelitian ini dipergunakan untuk memenuhi salah satu prasyarat kelulusan di Jurusan Fisika Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan penulisan proposal ini bukan karena usaha keras dari penulis, namun karena adanya dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin berterima kasih kepada:

1. Bapak dan Ibu tercinta yang selalu mendukung dan memberikan motivasi serta doa terhadap penulis.
2. Disa dan Dana, adik-adik yang selalu memberikan semangat untuk segera lulus.
3. Bapak Setyawan Purnomo Sakti selaku sebagai Dosen Pembimbing Pertama atas segala bentuk bantuan dan bimbingan dalam penelitian ini.
4. Bapak Agus Naba sebagai pembimbing kedua penulis yang telah memberi arahan di awal program ini serta bimbingannya selama penelitian.
5. Bapak. Muhammad Nurhuda, selaku Kepala Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya.
6. Ragil Danang K, M. Warits Ishari, Intan Trisnawati, Mas Ridha N, Mas Imron R, Mas Daniel, Mbak Nike, Mas Akhirul dan Mbak Saila selaku teman-teman satu lab teknologi sensor yang selalu memberikan masukan dan arahan dalam penelitian ini.
7. Teman-teman satu prodi Instrumentasi yang telah memberikan semangat.
8. Serta semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan proposal ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan yang terdapat dalam proposal ini. Oleh karenanya, penulis minta maaf kepada semua pihak.

Malang, 30 November 2018

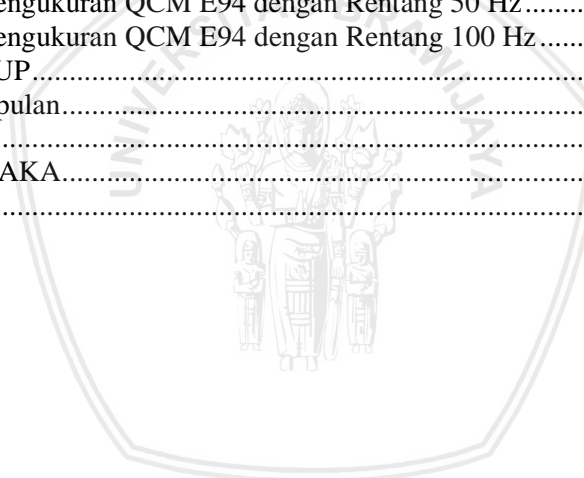
Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Impedansi	5
2.2. Pengukuran Impedansi	7
2.2.1. Metode Bridge (Jembatan).....	7
2.2.2. Metode Resonant (Resonansi)	8
2.2.3. Metode I-V (Arus-Tegangan)	9
2.2.4. Metode RF I-V	9
2.3. Quartz Crystal Microbalance	10
2.4. PIC32MX460F512L.....	12
2.4.1 <i>Analog Digital Converter</i> pada PIC32MX460F512L	13
2.5. AD8302	14
2.6. Komunikasi UART.....	16
2.7. Voltage Divider	17
2.8. Omicron Lab Bode 100	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian	21
3.2 Alat dan Bahan	21
3.3 Tahapan Penelitian	21
3.3.1 Studi Literatur.....	22
3.3.2 Desain Sistem Minimum PIC32MX460F512L.....	22
3.3.3 Desain Rangkaian DUT	24
3.3.4 Perangkaian Alat.....	25

3.3.5	Pembuatan Program	26
3.3.6	Pembuatan <i>Casing</i>	27
3.3.7	Penulisan Laporan	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Hasil Rancangan Sistem Pengukuran	29
4.2	Pengujian Sistem Pengukuran	31
4.2.1.	Pengujian Sistem Minimum PIC32MX460F512L ...	31
4.2.2.	Pengujian UART PIC32MX460F512L.....	32
4.2.3.	Pengujian Rangkaian DUT	33
4.2.4.	Pengujian Sistem Pengukuran.....	33
4.3	Pengambilan Data Impedansi	33
4.3.1.	Pengukuran QCM E43 dengan Rentang 50 Hz.....	34
4.3.2.	Pengukuran QCM E43 dengan Rentang 100 Hz.....	37
4.3.3.	Pengukuran QCM E46 dengan Rentang 50 Hz.....	40
4.3.4.	Pengukuran QCM E46 dengan Rentang 100 Hz.....	42
4.3.5.	Pengukuran QCM E94 dengan Rentang 50 Hz.....	45
4.3.6.	Pengukuran QCM E94 dengan Rentang 100 Hz.....	47
BAB V PENUTUP.....		51
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....		53
LAMPIRAN 1		55



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Impedansi (Z) yang terdiri dari bagian real (R) dan Imajiner (Keysight, 2016)	5
Gambar 2. 2 Penggambaran seri dan paralel yang dikombinasikan dari komponen real dan imajiner (Keysight, 2016).....	6
Gambar 2. 3 Reaktansi dalam dua bentuk, Induktansi dan Kapasitansi (Keysight, 2016)	6
Gambar 2. 4 Hubungan antara parameter admitansi dan impedansi (Keysight, 2016).....	7
Gambar 2. 5 Gambar Rangkaian metode Bridge dan persamaannya (Keysight, 2016).....	8
Gambar 2. 6 Rangkaian metode resonansi (Keysight, 2016).....	8
Gambar 2. 7 Rangkaian dari metode I-V beserta persamaannya (Keysight, 2016).....	9
Gambar 2. 8 Rangkaian RF I-V low impedance dan persamaannya (Keysight, 2016).....	10
Gambar 2. 9 Rangkaian RF I-V low impedance dan persamaannya (Keysight, 2016).....	10
Gambar 2. 10 Rangkaian QCM dengan metode topologi Butterworth-Van Dyke (Casteleir_Roca, Calvo-Rolle, Meizoso-Lopez, Pinon-Pazos, & Rodriguez-Gomez, 2014).....	11
Gambar 2. 11 Bentuk dari <i>Quartz Crystal Microbalance</i> (Sullivan & Guilbault, 1999)	12
Gambar 2. 12 IC PIC32MX460F512L (microchip, 2011).....	13
Gambar 2. 13 Diagram <i>block</i> modul ADC (microchip, 2011).....	14
Gambar 2. 14 Rangkaian minimum dari AD8302 (Device, 2002)...	16
Gambar 2. 15 Format komunikasi data pada UART (Toulson & Wilmshurst, 2017).....	17
Gambar 2. 16 Rangkaian pembagi tegangan dengan dua resistor disusun secara seri (Artanto, 2017).....	18
Gambar 2. 17 Omicron Lab Bode 100 beserta DUT <i>impedance analyzernya</i> (Lab, 2012).....	19
Gambar 3. 1 Diagram Blok Tahapan Penelitian	21
Gambar 3. 2 Schematic dari system minimum PIC32MX460F512L	22
Gambar 3. 3 Board PCB dari system minimum PIC32MX460F512L	23

Gambar 3. 4 Hasil desain sistem minimum	23
Gambar 3. 5 Schematic dari rangkaian DUT	24
Gambar 3. 6 PCB board dari rangkaian DUT	24
Gambar 3. 7 Hasil Desain DUT.....	25
Gambar 3. 8 Diagram blok sistem pengukuran impedansi	26
Gambar 3. 9 Perangkaian sistem pengukuran impedansi.....	25
Gambar 3. 10 Flow chart progam pengukuran impedansi	27
Gambar 4. 1 Hasil rancangan sistem pengukuran impedansi	29
Gambar 4. 2 Grafik pengukuran impedansi pada QCM E43	35
Gambar 4. 3 Perbandingan antara impedansi QCM E43 yang diukur dengan referensinya.....	36
Gambar 4. 4 Pengukuran impedansi pada QCM E43	38
Gambar 4. 5 Perbandingan antara impedansi QCM E43 yang diukur dengan referensinya.....	39
Gambar 4. 6 Pengukuran impedansi pada QCM E46	41
Gambar 4. 7 Perbandingan antara impedansi QCM E46 yang diukur dengan referensinya.....	41
Gambar 4. 8 Pengukuran impedansi pada QCM E46	43
Gambar 4. 9 Perbandingan antara impedansi QCM E46 yang diukur dengan referensinya.....	44
Gambar 4. 10 Pengukuran impedansi pada QCM E94	46
Gambar 4. 11 Perbandingan antara impedansi QCM E94 yang diukur dengan referensinya.....	46
Gambar 4. 12 Pengukuran impedansi pada QCM E94	48
Gambar 4. 13 Perbandingan antara impedansi QCM E94 yang diukur dengan referensinya.....	49

DAFTAR TABEL

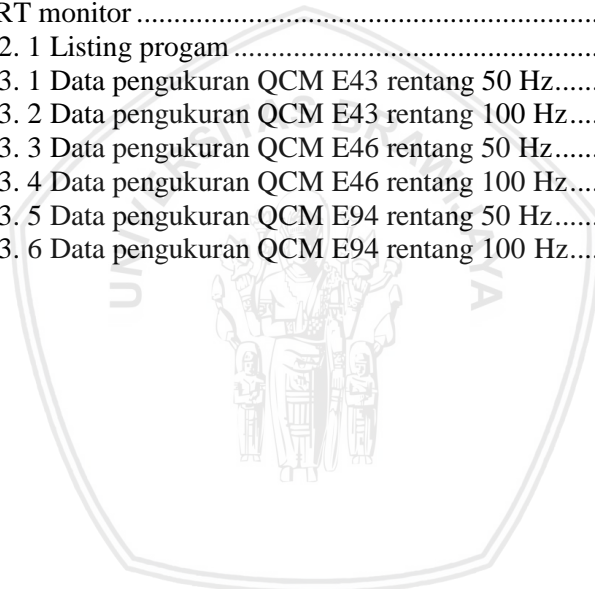
Tabel 4. 1 Hasil uji sistem minimum	32
Tabel 4. 2 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya ...	35
Tabel 4. 3 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya ...	37
Tabel 4. 4 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya ...	40
Tabel 4. 5 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya ...	42
Tabel 4. 6 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya ...	45
Tabel 4. 7 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya ...	47





DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. 1 Pengujian rangkaian DUT dengan osiloskop dan signal generator	55
Lampiran 1. 2 Hasil sinyal dari pengujian rangkaian DUT dengan osiloskop dan signal generator	55
Lampiran 1. 3 Proses Pengambilan data impedansi dengan modul PIC32MX460F512L dan AD8302	56
Lampiran 1. 4 Proses Pengambilan data impedansi dengan modul PIC32MX460F512L dan AD8302 serta interface berupa komputer	56
Lampiran 1. 5 Data pengukuran impedansi yang ditampilkan pada USART monitor	57
Lampiran 2. 1 Listing progam	58
Lampiran 3. 1 Data pengukuran QCM E43 rentang 50 Hz.....	60
Lampiran 3. 2 Data pengukuran QCM E43 rentang 100 Hz.....	61
Lampiran 3. 3 Data pengukuran QCM E46 rentang 50 Hz.....	63
Lampiran 3. 4 Data pengukuran QCM E46 rentang 100 Hz.....	64
Lampiran 3. 5 Data pengukuran QCM E94 rentang 50 Hz.....	66
Lampiran 3. 6 Data pengukuran QCM E94 rentang 100 Hz.....	67





BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan zaman memberikan dampak besar terhadap perkembangan teknologi yang ada, khususnya adalah pada bidang sensor pengukuran. Salah satu sensor yang saat ini banyak dikembangkan yaitu Quartz Crystal Microbalance atau yang biasa disebut dengan QCM. QCM merupakan salah satu sensor yang dapat mengukur perubahan massa pada medium liquid maupun gas. Respon dari perubahan massa QCM sendiri dapat diukur melalui perubahan frekuensi maupun dari perubahan impedansi yang diterimanya. Banyak sekali aplikasi dari sensor QCM yang digunakan saat ini, seperti sensor kimia, sensor gas, sensor biosains dan lainnya (Ikhsani & Sakti, 2017).

Impedansi merupakan salah besaran fisika yang bisa menunjukkan massa dari sebuah sensor QCM. Impedansi dapat digunakan untuk mengetahui perubahan massa sensor QCM dikarenakan impedansi terdapat dalam domain waktu. Impedansi sendiri merupakan sebuah besaran kompleks dengan besaran satuan Ohm (Ω), dan dilambangkan dengan “Z” (W. Hayt, J. Kemmerly, 2005)

Salah satu instrumen yang berfungsi untuk mengukur dan menganalisa impedansi adalah *impedance analyser*. Salah satu impedance analyser yang terdapat pada pasaran adalah buatan dari Omicron Lab yang dapat bekerja pada kisaran frekuensi 5 Hz hingga 3 GHz untuk seri *network analysernya* (Lab, 2012). Terdapat juga penelitian yang dilakukan oleh Takanori Yonekura untuk mendapatkan pengukuran *impedance analyser* dengan *satu port* pada frekuensi tinggi diatas 1.8 GHz. Dengan menggunakan metode arus-tegangan (*I-V method*) agar menghasilkan pengukuran yang sangat presisi pada *impedance* dengan rentang yang sangat lebar. Salah satu manfaat pengukuran impedansi yaitu *user* dapat mengetahui karakterisasi dari suatu sampel didalam sensor QCM. Selain karakterisasi sampel, dapat diketahui juga tingkat hambatan listrik dari suatu komponen atau rangkaian. (Yonekura, 1994).

Namun diantara instrumen dan penelitian yang telah dilakukan, terdapat kekurangan yang penulis kira sangat besar. Pada bentuk instrumen yang ada memiliki ukuran yang besar, sehingga

repository.ub.ac.id

sangat tidak efisien ketika ingin melakukan pengukuran di berbagai tempat. Selain itu daya yang digunakan pada instrumen tersebut sangat besar, sehingga tidak efektif pada saat ini.

Penulis menawarkan sebuah solusi serta menggunakan karya ini sebagai tugas akhir, dikarenakan penulis menginginkan sebuah alat yang digunakan untuk pengukuran impedansi sensor QCM tersebut agar lebih efisien untuk digunakan, yang diartikan sebagai efisien adalah alat ini dapat digunakan dimana-mana yang berarti alat ini cukup ringan untuk dibawa serta menghemat daya. Penggunaan mikrokontroler ini juga dapat diaplikasikan sebagai *main board* dengan banyak pin *input* serta *output* yang dapat digunakan untuk keperluan lain.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

- Bagaimana rancangan sistem pengukur penguatan dan pergeseran *phase* untuk menentukan impedansi sensor QCM?
- Bagaimana system akuisisi data tegangan hasil pengukuran Impedansi dengan menggunakan mikrokontroler 32 bit PIC32MX460F512L?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang terdapat pada penelitian dijelaskan sebagai berikut:

- Frekuensi sinyal yang digunakan hanya dalam kisaran berada disekitar 10 MHz.
- Instrumen ini hanya digunakan sebagai pengukuran impedansi.
- Pembanding hasil impedansi adalah *bode impedance analyser*.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

- Merancang dan membangun sistem akuisisi tegangan dengan menggunakan mikrokontroler 32 bit dan dikomunikasikan ke personal computer.

- b. Merancang dan membangun sistem pengukur beda phase dan penguatan tegangan untuk menentukan impedansi sensor QCM.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mempermudah dalam pengukuran impedansi suatu sinyal dan terciptanya instrumen pengukuran impedansi.



Halaman ini sengaja dikosongkan

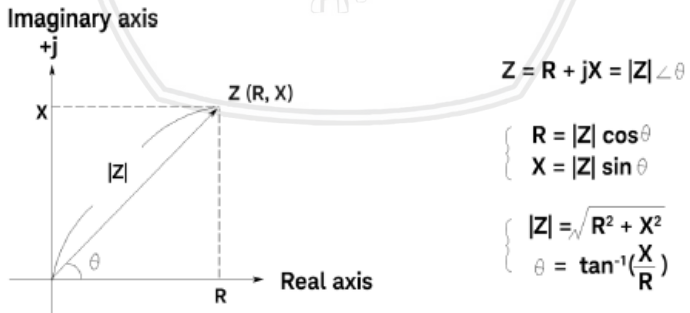


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

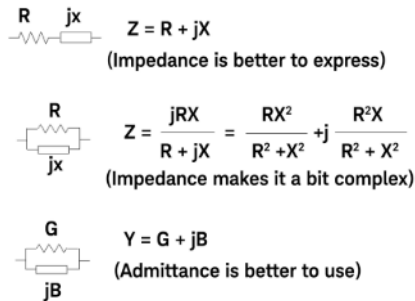
2.1. Impedansi

Impedansi merupakan parameter yang penting untuk digunakan sebagai karakterisasi rangkaian, komponen dan material yang digunakan untuk membuat suatu instrumen. Impedansi (Z) pada umumnya didefinisikan sebagai penjumlahan total dari hambatan suatu alat atau rangkaian yang dilewati oleh arus bolak-balik (AC) pada frekuensi tertentu, dan direpresentasikan sebagai kuantitas kompleks yang ditunjukkan secara grafis pada bidang vektor. Sebuah vektor impedansi terdiri dari bagian nyata (resistansi, R) dan bagian imajiner (reaktansi, X) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Impedansi dapat dinyatakan dengan menggunakan bentuk koordinat persegi panjang $R + jX$ atau dalam bentuk kutub sebagai sudut magnitudo dan fasa: $|Z| \angle \theta$ (Keysight, 2016)

Dalam beberapa kasus, menggunakan timbal balik impedansi secara matematis sangat tepat. Dalam hal ini $1 / Z = 1 / (R + jX) = Y = G + jB$, di mana Y mewakili *admittance*, G *conductance*, dan B *susceptance*. Unit impedansi adalah ohm (Ω), dan penerimaannya adalah siemen (S). Impedansi adalah parameter yang umum digunakan dan sangat berguna untuk merepresentasikan rangkaian seri untuk resistansi dan reaktansi, karena dapat dinyatakan hanya sebagai penjumlahan, R dan X . Untuk koneksi paralel, lebih baik menggunakan *admittance* seperti Gambar 2.2. (Keysight, 2016)



Gambar 2. 1 Impedansi (Z) yang terdiri dari bagian real (R) dan Imajiner (Keysight, 2016)



Gambar 2. 2 Penggambaran seri dan paralel yang dikombinasikan dari komponen real dan imajiner (Keysight, 2016)

Reaktansi mengambil dua bentuk sebagai berikut yaitu induktif (XL) dan kapasitif (Xc). Didefinisikan sebagai,

$$X_L = 2\pi fL \tag{2.1}$$

dan

$$X_C = 1 / (2\pi fC), \tag{2.2}$$

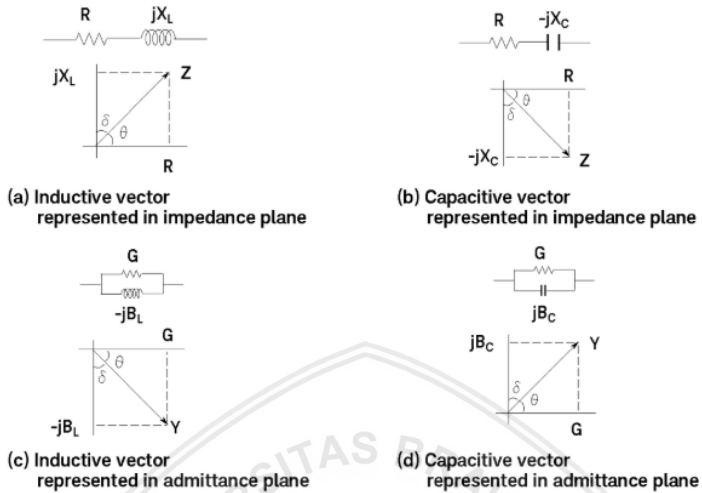
dimana f adalah frekuensi, L adalah induktansi, dan C adalah kapasitansi. $2\pi f$ dapat diganti dengan frekuensi sudut (ω : omega) untuk mewakili $X_L = \omega L$ dan $X_c = 1 / (\omega C)$. Mengacu pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Reaktansi dalam dua bentuk, Induktansi dan Kapasitansi (Keysight, 2016)

Faktor kualitas (Q) berfungsi sebagai ukuran kemurnian reaktansi (seberapa dekatnya dengan reaktansi murni, tidak ada tahanan), dan didefinisikan sebagai rasio energi yang tersimpan dalam komponen terhadap energi yang dihamburkan oleh komponen. Q adalah unit berdimensi dan dinyatakan sebagai $Q = X / R = B / G$. Dari Gambar 2.4, Terlihat bahwa Q adalah tangent dari sudut θ . Q biasanya diterapkan pada induktor; Untuk kapasitor istilah yang lebih sering digunakan untuk mengekspresikan kemurnian adalah faktor

disipasi (D). Kuantitas ini hanyalah timbal balik dari Q (Keysight, 2016)



$$Q = \frac{1}{D} = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_L}{R} = \frac{-X_C}{R} = \frac{-B_L}{G} = \frac{B_C}{G}$$

Gambar 2. 4 Hubungan antara parameter admitansi dan impedansi (Keysight, 2016)

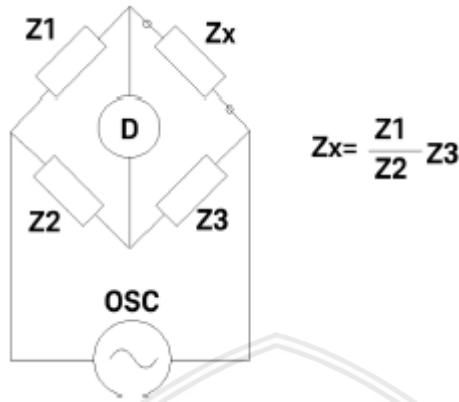
2.2. Pengukuran Impedansi

Terdapat banyak metode pengukuran yang bisa dipilih saat mengukur impedansi, dimana masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Diharuskan mempertimbangkan persyaratan dan kondisi pengukuran, kemudian memilih metode yang paling tepat, sambil mempertimbangkan faktor-faktor seperti cakupan frekuensi, jangkauan pengukuran, akurasi pengukuran, dan kemudahan pengoperasian. Pilihan tersebut akan menunjukkan bahwa tidak satupun metode pengukuran dapat mengukur semua yang ada. Terdapat beberapa metode pengukuran impedansi (Keysight, 2016).

2.2.1. Metode Bridge (Jembatan)

Bila tidak ada arus yang mengalir melalui detektor (D), nilai impedansi yang tidak diketahui (Z_x) dapat diperoleh dengan hubungan elemen jembatan lainnya. Berbagai jenis rangkaian *bridge* menggunakan kombinasi komponen L, C, dan R sebagai elemen *bridge* serta digunakan untuk berbagai aplikasi. Metode *Bridge*

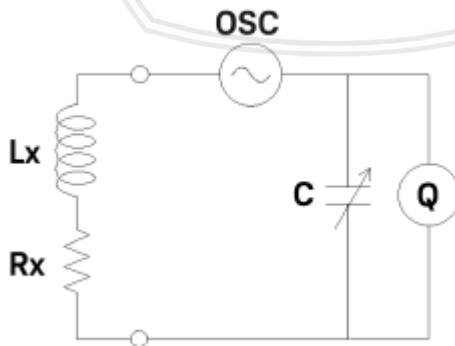
memiliki range pengukuran diatas 120 MHz. Metode bridge tampak pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Gambar Rangkaian metode Bridge dan persamaannya (Keysight, 2016)

2.2.2. Metode Resonant (Resonansi)

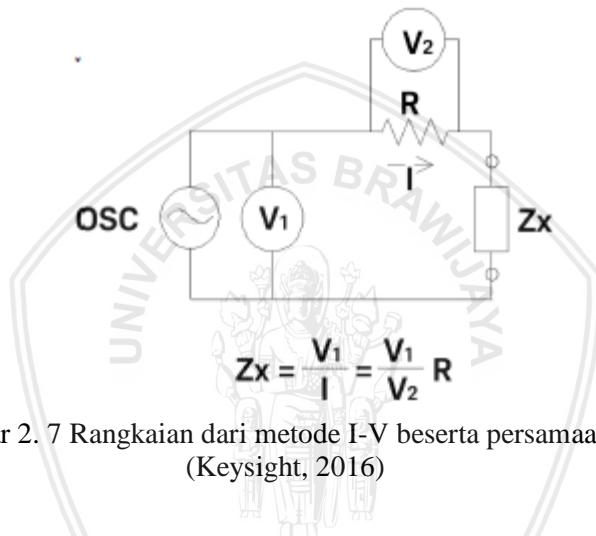
Rangkaian disesuaikan dengan resonansi dengan mengatur kapasitor tuning (C), impedansi impedansi Lx dan nilai Rx yang tidak diketahui akan diperoleh dari frekuensi uji, nilai C, dan nilai Q. Q diukur secara langsung menggunakan voltmeter yang ditempatkan di kapasitor *tuning*. Karena *noise* rangkaian pengukuran sangat rendah, nilai Q tertinggi yang dapat diukur adalah 300 Ohm. Selain *direct connection* yang ditunjukkan di sini, koneksi seri dan paralel tersedia untuk berbagai pengukuran impedansi. Metode Resonant ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Rangkaian metode resonansi (Keysight, 2016)

2.2.3. Metode I-V (Arus-Tegangan)

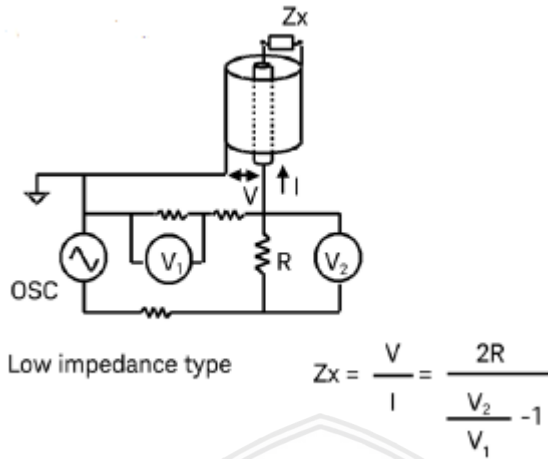
Impedansi yang tidak diketahui (Z_x) dapat dihitung dari tegangan dan nilai arus yang diukur. Arus dihitung menggunakan pengukuran tegangan melintasi resistor dengan nilai kecil yang diketahui secara akurat (R .) Prakteknya, transformator dengan loss yang kecil digunakan sebagai pengganti R untuk mencegah efek yang disebabkan oleh menempatkan resistor bernilai rendah di sirkuit. Namun, transformator membatasi batas akhir rentang frekuensi yang berlaku. Metode I-V ditunjukkan pada Gambar 2.7.



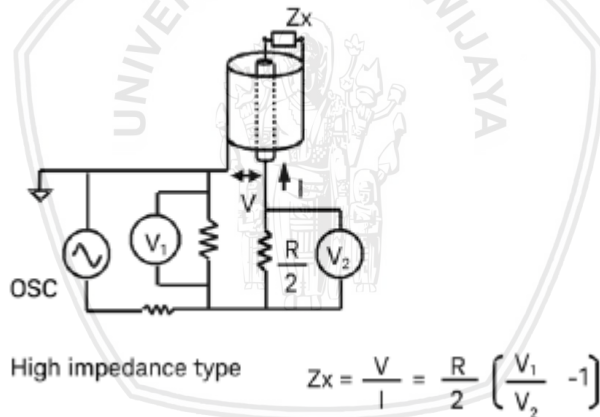
Gambar 2. 7 Rangkaian dari metode I-V beserta persamaannya (Keysight, 2016)

2.2.4. Metode RF I-V

Metode pengukuran RF I-V didasarkan pada prinsip yang sama dengan metode I-V, dikonfigurasi dengan cara yang berbeda dengan menggunakan rangkaian pengukuran impedansi yang sesuai (50Ω) dan port uji koaksial yang presisi untuk operasi pada frekuensi yang lebih tinggi. Ada dua jenis pengaturan voltmeter dan current meter yang disesuaikan pada pengukuran impedansi rendah dan pengukuran impedansi tinggi. Seperti pada gambar 2.8 dan gambar 2.9 dimana frekuensi terbaik yang dapat diukur dari 100 MHz hingga 3 GHz.



Gambar 2. 8 Rangkaian RF I-V low impedance dan persamaannya (Keysight, 2016)

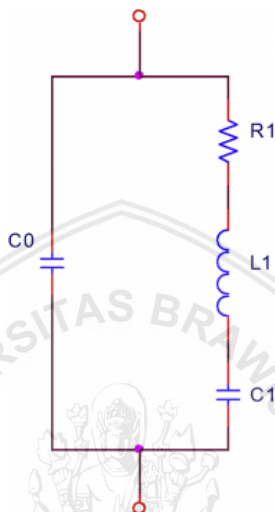


Gambar 2. 9 Rangkaian RF I-V low impedance dan persamaannya (Keysight, 2016)

2.3. Quartz Crystal Microbalance

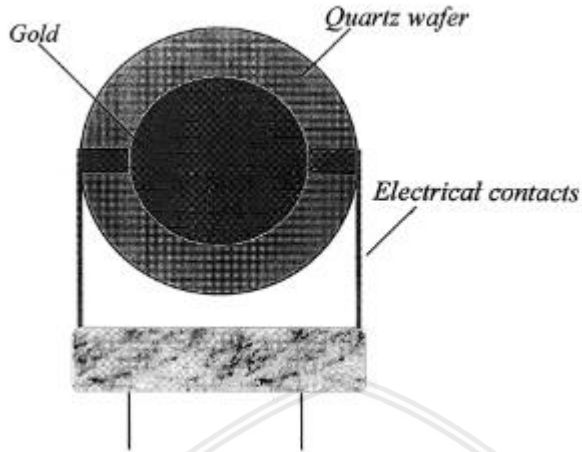
Quartz Crystal Microbalance merupakan sensor piezoelektrik yang digunakan untuk mengukur perubahan massa yang banyak digunakan dalam bidang biosensor, sensor fisik, dan sensor kimia. Pergeseran frekuensi pada sensor QCM sebanding dengan

banyaknya jumlah massa yang terdapat pada permukaan sensor. Kelebihan utama pada sensor QCM yaitu dapat dikembangkan secara cepat pada berbagai disiplin ilmu, harga yang cukup murah, *substrate* yang dapat dimodifikasi, pengukuran yang dapat dilakukan secara *real-time*, dan respons yang cepat (Khusnah, Sakti, & Santjojo, 2018)



Gambar 2. 10 Rangkaian QCM dengan metode topologi Butterworth-Van Dyke (Casteleir_Roca, Calvo-Rolle, Meizoso-Lopez, Pinon-Pazos, & Rodriguez-Gomez, 2014)

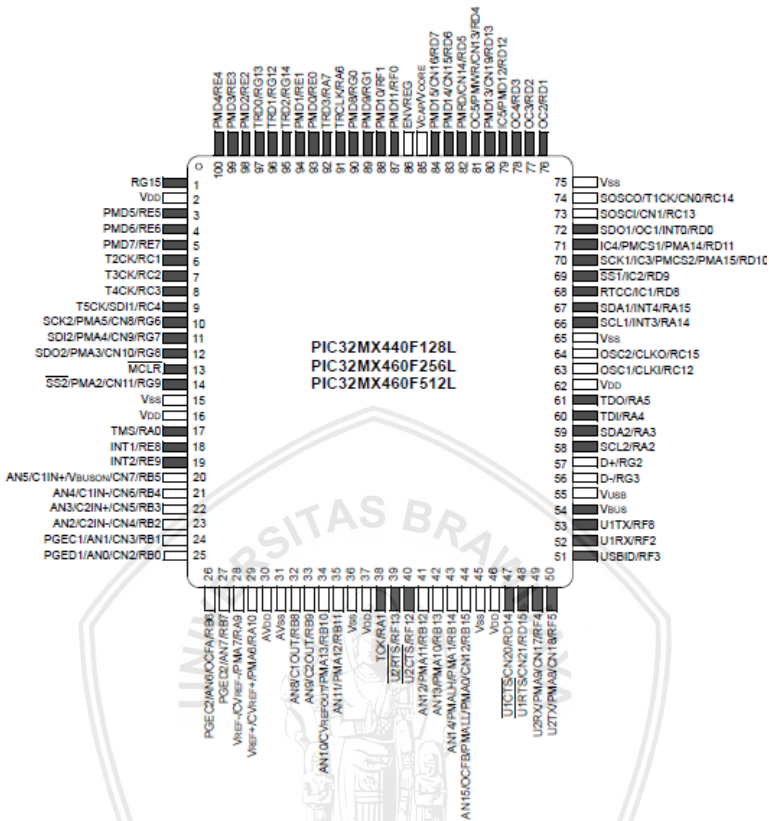
Topologi Butterworth-Van Dyke merupakan persamaan yang ekuivalen atau hampir sama dengan RLC seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.10. Rangkaian tersebut memiliki rangkaian paralel berupa kapasitor C0 digabungkan dengan rangkaian seri berisi resistor R1, induktor L1, dan kapasitor C1. Dengan menggunakan topologi BVD ini, pemodelan QCM dapat lebih mudah diteliti. Kapasitor C0 merupakan *static capacitance* atau kapasitansi statis dan bergantung pada geometri dari QCM, sedangkan rangkaian seri RLC pada topologi BVD tidak mempunyai arti elektrik tertentu, dimana hanya memodelkan fenomena mekanis terkait performanya (Casteleir_Roca et al., 2014).



Gambar 2. 11 Bentuk dari *Quartz Crystal Microbalance* (Sullivan & Guilbault, 1999)

2.4. PIC32MX460F512L

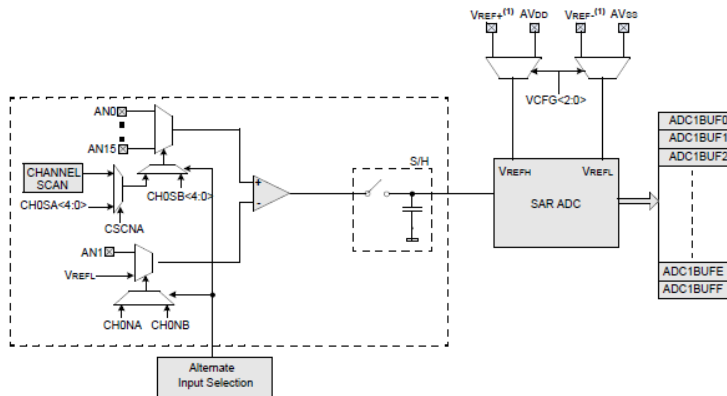
Merupakan mikrokontroler buatan MicroChip dengan kapasitas 32-bit. Mikrokontroler pada tugas akhir ini berfungsi sebagai pengolah data sinyal frekuensi dan komunikasi USB. Tipe mikrokontroler ini adalah TQPF dimana pemasangan pin pada PAD-nya hanya direkatkan dengan timah. PIC32MX460F512L menyediakan 100 pin yang terdiri dari 7 *pin port* RA, RB, RC, RD, RE, RF, dan RG. Pin tersebut memiliki fungsi yang berbeda antara satu dan yang lain, yaitu I/O pin, USB DMA channel, UART, ADC, komparator. PIC32MX460F512L memori program sebesar 256 KB dan memori data sebesar 32 KB. Selain itu terdapat beberapa fitur yang ditawarkan oleh PIC32MX460F512L yaitu 10-bit ADC, internal osilator sebesar 80 MHz, EUART, SPI, I2C, USB *On-The-Go*, *Parallel Master Port* dan *Slave Port*, lima *input capture*, lima *output PWM*, lima *input interrupt*, *Real-Time clock* dan kalender (microchip, 2011)



Gambar 2. 12 IC PIC32MX460F512L (microchip, 2011)

2.4.1 Analog Digital Converter pada PIC32MX460F512L

Analog digital converter atau biasa disebut dengan ADC adalah sebuah perangkat elektronik yang berfungsi untuk merubah sinyal analog yang bekerja secara kontinu menjadi sinyal digital yang bekerja secara diskrit. ADC dapat berbentuk modul terpisah, dan dapat juga terdapat dalam suatu *Integrated Circuit* (IC) salah satunya terdapat dalam mikrokontroler. Fitur ADC yang terdapat didalam PIC32MX460F512L mempunyai resolusi sebesar 10 bit yang berarti ADC ini dapat memproses sampel data sebanyak 1024. Kecepatan *sampling* yang dimiliki sebesar 1000 kbps atau 1 mbps dan memiliki *analog input* hingga 16 pin. Kecepatan *sampling* merupakan kecepatan untuk mengkonversi data *analog* menjadi data *digital* pada selang waktu tertentu (microchip, 2011).



Gambar 2. 13 Diagram *block* modul ADC (microchip, 2011)

Prinsip kerja ADC ketika terdapat sebuah sinyal masukan maka akan dikonversi menjadi besaran yang merupakan rasio antara sinyal masukan dengan tegangan referensi. Persamaan umum yang sederhana dapat dituliskan sebagai berikut (Pelgrom, 2017).

$$ADC = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}} \right) \times bit\ ADC \quad (2.1)$$

Melalui persamaan diatas nilai ADC dapat ditentukan melalui perbandingan masukan dengan referensinya, lalu dikalikan dengan jumlah bit ADC yang ada. Dimana untuk ADC pada PIC32MX460F512L digunakan.

$$ADC = \left(\frac{V_{in}}{3.3} \right) \times 1024 \quad (2.2)$$

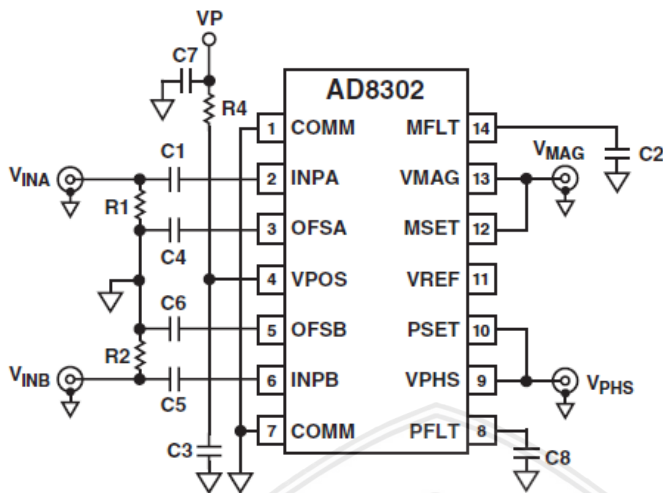
Nilai 1024 merupakan banyaknya bit ADC dalam PIC32MX460F512L, dimana bit ADC berjumlah 10 Bit. Nilai dari V referensi PIC32MX460F512L sebesar 3.3 Volt.

2.5. AD8302

AD8302 merupakan sistem yang terintegrasi yang berfungsi untuk pengukuran *gain/loss* pada receiver, transmitter dan berbagai peralatan yang lain. AD8302 memerlukan sumber daya *single supply* 2.7 V hingga 5.5 V, namun sumber tegangan referensi pada *output* yang stabil berada pada 1.8 V. Memiliki 14 pin yang mempunyai kegunaan masing-masing. AD8302 memiliki tingkat keakuratan hingga 30 mV/dB dan jangkauan frekuensi mulai dari frekuensi rendah hingga menyentuh 2.7 GHz (Device, 2002)

Tabel 2. 1 Tabel fungsi pin AD8302 (Device, 2002)

No. Pin	Mnemonic	Fungsi
1, 7	COMM	Dihubungkan ke low impedance ground
2	INPA	Impedansi dengan High Input dihubungkan ke chanel A
3	OFSA	Dihubungkan dengan kapasitor ke ground untuk menentukan filter cornernya dan sebagai decoupling
4	VPOS	Dihubungkan ke sumber tegangan antara 2.7 V hingga 5.5 V
5	OFSB	Dihubungkan dengan kapasitor ke ground untuk menentukan filter cornernya dan sebagai decoupling
6	INPB	Dihubungkan ke chanel B dengan struktur yang sama pada INPA
8	PFLT	Terminal Low Past Filter untuk fase output
9	VPHS	Output Single-Ended Proporsional terhadap Selisih Fasa antara INPA dan INPB.
10	PSET	Pin feedback untuk penskalaan tegangan output pada mode pengukuran
11	VREF	Tegangan referensi dengan nilai 1.8 V
12	MSET	Pin feedback untuk penskalaan tegangan output pada mode pengukuran
13	VMAG	Output single-ended. Tegangan output akan proporsional terhadap decibel rasio yang akan diaplikasikan pada INPA dan INPB
14	MFLT	Low Pass Filter untuk output magnitde

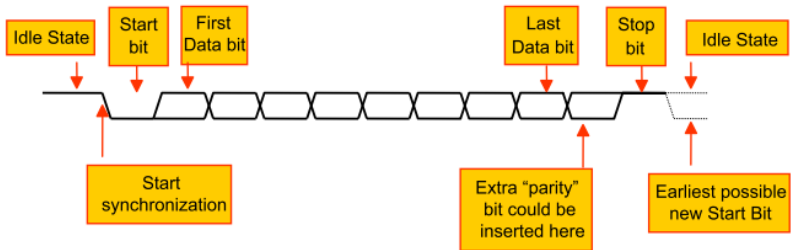


Gambar 2. 14 Rangkaian minimum dari AD8302 (Device, 2002)

2.6. Komunikasi UART

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter atau biasa disebut dengan UART merupakan salah satu *interface* dari komunikasi data yang cukup tua. Beberapa fiturnya khusus dibuat untuk kebutuhan dari mesin *teletypewriters* pertama didunia. Pada saat ini untuk menemukan tidak cukup sulit, dimana masih banyak penggunaan UART dalam sistem minimum sebuah mikrokontroller. Bentuk UART dalam mikrokontroller sendiri sudah modern dengan memakai bentuk USB yang sama dengan USB pada komputer, sehingga memudahkan untuk penggunaan sebagai *device* komunikasi data antara mikrokontroller dengan komputer (Sotillo, 2014).

Pendekatan yang digunakan ketika penggunaan komunikasi data UART sebelumnya yaitu kecepatan data pada *transmitter*/pengirim maupun *receiver*/penerima telah ditetapkan dengan *baud rate*/kecepatan pengiriman data yang sama. Oleh karena itu pada tiap *node* dibutuhkan sumber *clock* yang akurat dan stabil. Pengiriman data/byte dibutuhkan pula sebuah frame yang diawali dengan start bit dan diakhiri dengan stop bit. Proses seperti ini memungkinkan untuk mensinkronisasi pengiriman data dari *transmitter* ke *receiver* (Toulson & Wilmshurst, 2017).

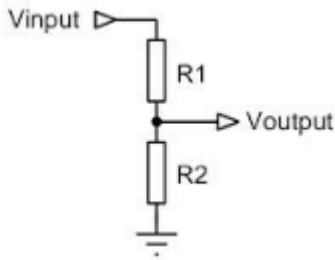


Gambar 2. 15 Format komunikasi data pada UART (Toulson & Wilmshurst, 2017)

Pada Gambar 2.12 telah diinisiasi bahwa permulaan dari format pengiriman data didahului oleh *start* bit. *Start* bit diletakkan pada posisi depan dikarenakan untuk sinkronisasi antar *transmitter* dan *receiver*. Delapan bit setelah *start* bit adalah data-data yang akan dikirimkan. Bit ke sembilan meripakaan *parity checking*, namun dalam beberapa kasus *parity checking* tidak digunakan. Setelah jalur pengiriman data dalam posisi *idle* atau dalam keadaan diam, maka secara otomatis akan membentuk *Stop* bit. Data yang lain dapat dikirimkan kembali jika *transmitter* telah mengkonfirmasi *stop* bit, dan akan mengirimkan kembali *start* bit dengan format yang sesuai seperti tadi. Pada umumnya UART memiliki satu koneksi/pin untuk pengiriman data yang disebut “TX”, dan satu koneksi lagi untuk penerimaan data yaitu “RX”. (Toulson & Wilmshurst, 2017).

2.7. Voltage Divider

Voltage Divider atau pembagi tegangan merupakan pengembangan dari Hukum Ohm. Pembagi tegangan merupakan suatu cara untuk menemukan tegangan dengan nilai tertentu yang sebanding dengan resistor-resistor yang menyusunnya. Umumnya pembagi tegangan dirangkai secara seri dan tersusun dengan minimal memiliki dua buah resistor seperti pada Gambar 2.13. Nilai tegangan *output* dapat dihitung melalui persamaan seperti berikut (Artanto, 2017).



$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Gambar 2. 16 Rangkaian pembagi tegangan dengan dua resistor disusun secara seri (Artanto, 2017)

Berdasarkan pada persamaan diatas, dapat disimpulkan bahwa besarnya nilai tegangan pada sebuah resistor dapat diketahui oleh perbandingan nilai tahanan resistor tersebut terhadap nilai tahanan total dari rangkaian. Untuk rangkaian yang memiliki nilai resistor yang sama, maka tegangan pada tiap resistor akan sama besarnya. Teknik pembagian tegangan ini cukup efektif untuk digunakan pada rangkaian yang memiliki dua resistor yang dipasang seri (Yohandri & Asrizal, 2016)

2.8. Omicron Lab Bode 100

Omicron Lab Bode 100 merupakan alat uji multifungsi yang dirancang untuk penggunaan *user* dalam bidang elektronika. Konsep dari bode 100 sendiri merupakan *hardware* yang dikontrol oleh *software Bode Analyzer Suite* yang dijalankan melalui komputer, menjadikan Bode 100 alat yang efisien dan fleksibel untuk berbagai macam aplikasi pengukuran yaitu:

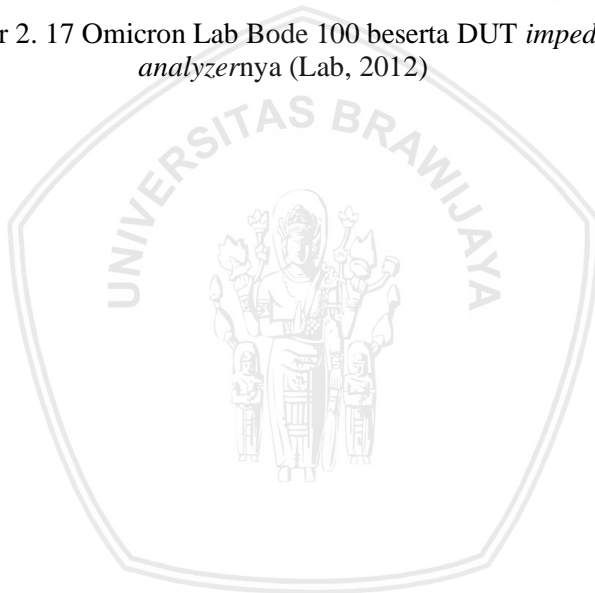
- ~ Pengukuran Gain/Fase, yang didalam rangkaian elektronik aktif maupun pasif.
- ~ Pengukuran Impedansi, Bode 100 dapat mengukur impedansi, admitansi, dan refleksi dalam berbagai koefisien rangkaian elektronik pasif maupun aktif
- ~ Serta pengukuran *Frekuensi Sweep*

Didalam Bode 100 juga terdapat *Direct Digital Synthesis* (DDS) sebagai sumber sinyal dengan level dan frekuensi yang dapat

diatur untuk DUTnya, dua penerima respon proses dari DUT dan mikrokontroler (Lab, 2012).



Gambar 2. 17 Omicron Lab Bode 100 beserta DUT *impedance analyzernya* (Lab, 2012)



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dari Bulan Februari 2018 hingga Juli 2018 dan bertempat pada Laboratorium Teknologi Sensor Gedung Fisika Lantai 2, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya.

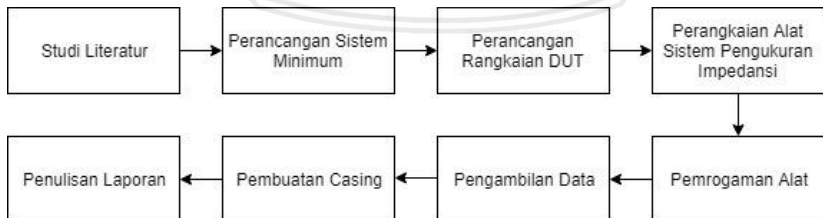
3.2 Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini digunakan dan diperlukan alat dan bahan sebagai berikut:

- a. PIC32MX460F512L
- b. Rangkaian DUT I-V Method
- c. OPA820
- d. PICKIT 3
- e. AD8302 Circuit
- f. Kabel Coaxial
- g. PC/Laptop
- h. USB FTDI UART

3.3 Tahapan Penelitian

Sebelum memulai penelitian ini, dibuatlah tahapan penelitian agar mempermudah jalanya penelitian. Adapun tahap-tahap penelitiannya adalah seperti yang ditunjukkan pada diagram proses berikut.



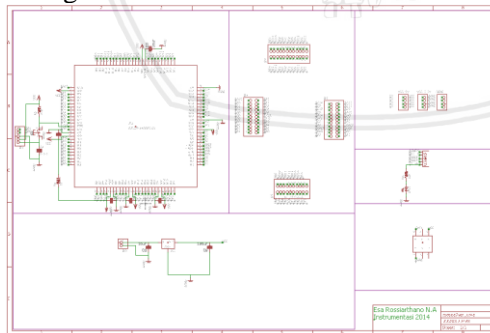
Gambar 3. 1 Diagram Blok Tahapan Penelitian

3.3.1 Studi Literatur

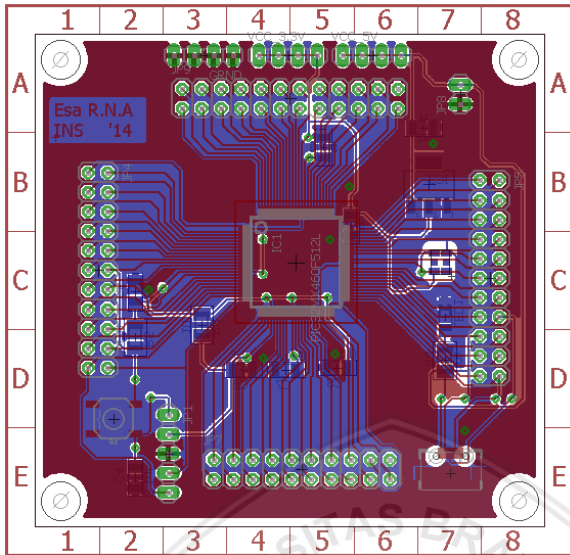
Tahapan Studi literatur adalah dimana penulis mempelajari tentang apa apa saja yang akan dikerjakan serta untuk memperdalam landasan teori tentang penelitian yang dikerjakan. Pada studi literatur beberapa hal yang dilakukan antara lain mempelajari tentang metode dalam pengambilan sinyal dari sumber sinyal (*signal generator*), mempelajari rangkaian DUT sebagai representasi dari metode pengukuran impedansi, mempelajari PIC32MX460F512L yang digunakan sebagai prosesor dalam alat yang dibuat, mempelajari pemrograman dalam proses pengukuran sinyal, mempelajari komunikasi data menggunakan USB, serta mempelajari pemrograman Delphi sebagai proses interfacing.

3.3.2 Desain Sistem Minimum PIC32MX460F512L

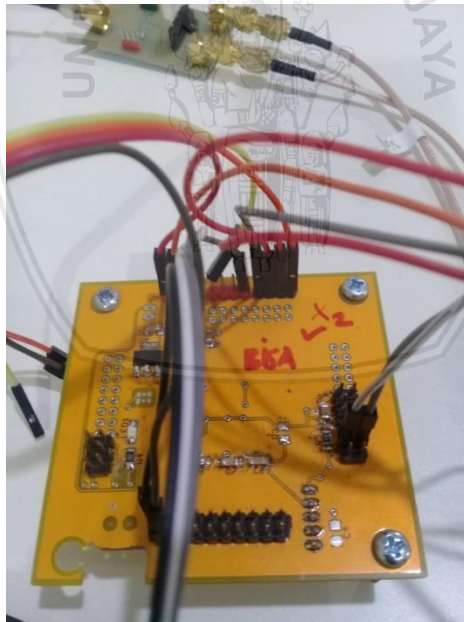
Setelah dilakukan studi literatur maka langkah selanjutnya adalah mendesain sistem minimum. Pembuatan sistem minimum ini dibagi menjadi dua, yaitu untuk mikrokontroler PIC32MX460F512L. Dalam pembuatan sistem minimum juga dibagi kedalam dua bagian yaitu bagian desain dan pemasangan atau *soldering*. Untuk mendesain sistem minimum PIC32MX460F512L digunakan software Eagle baik untuk pembuatan skematik maupun desain *board* yang kemudian akan dicetak kedalam PCB (*Printed Circuit Board*). Gambaran *schematic* dan *board* PIC32MX460F512L yang telah di desain adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Schematic dari system minimum PIC32MX460F512L



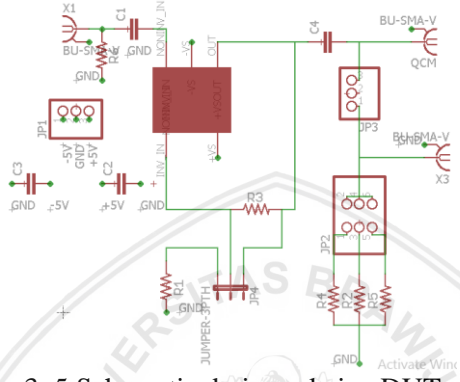
Gambar 3. 3 Board PCB dari system minimum PIC32MX460F512L



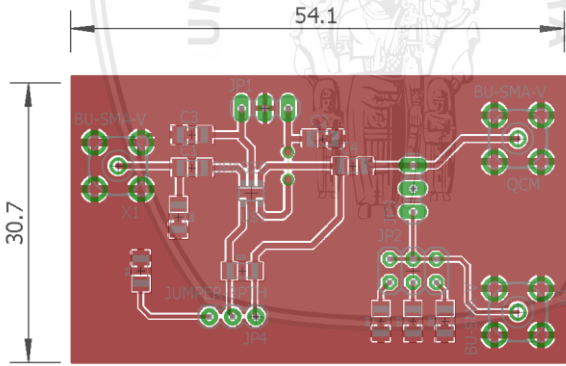
Gambar 3. 4 Hasil desain sistem minimum

3.3.3 Desain Rangkaian DUT

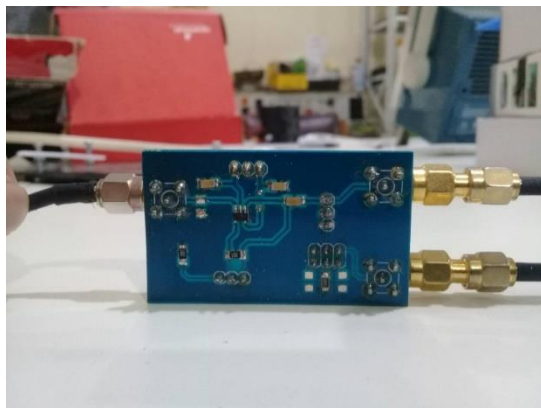
Desain rangkaian DUT digunakan sebagai representasi I-V *method* sehingga sinyal input yang masuk dapat diukur impedansinya. Rancangan rangkaian DUT dibuat menggunakan Eagle sehingga nanti akan ada dua *file* yang masing-masingnya adalah *schematic* dan *board*. Ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 3. 5 Schematic dari rangkaian DUT



Gambar 3. 6 PCB board dari rangkaian DUT

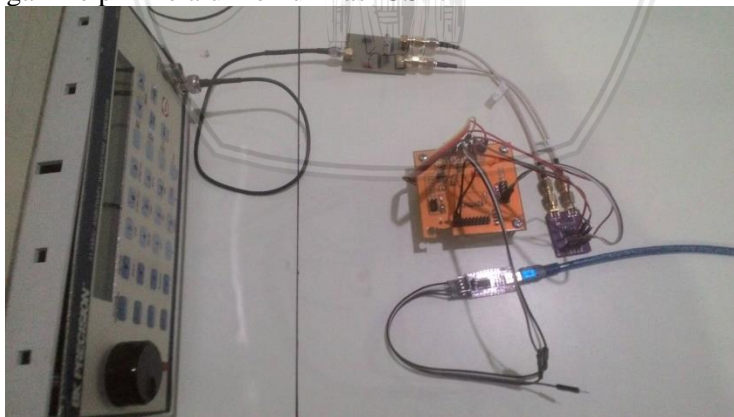


Gambar 3. 7 Hasil Desain DUT

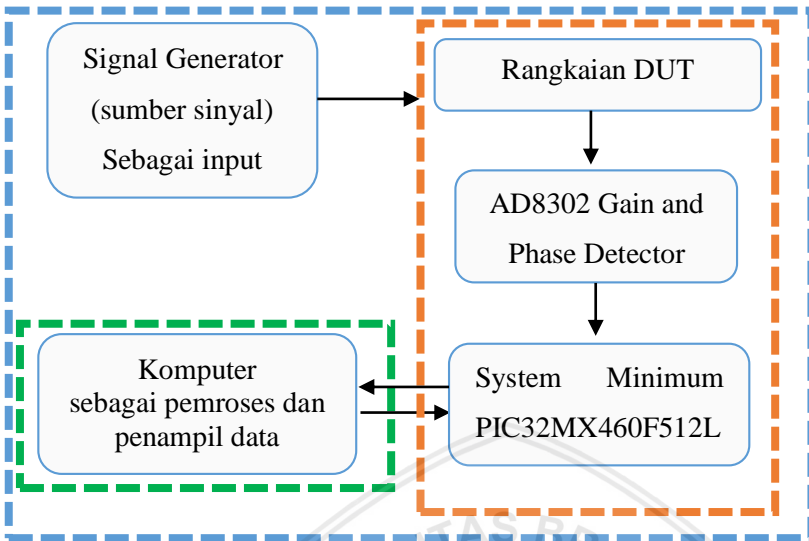
3.3.4 Perangkaian Alat

Setelah melakukan desain dan dicetak pada PCB, hal selanjutnya yang penulis lakukan adalah merangkai/menyolder komponen yang dibutuhkan kedalam sistem *minimum*, kemudian melakukan *continuity test* untuk memastikan semua jalur sudah terhubung dengan benar.

Tahapan merangkai alat ini adalah dimana penulis menyusun beberapa komponen untuk menjadi suatu kesatuan sistem yang utuh, mulai modul system minimum, rangkaian DUT serta *interfacing* dengan Delphi melalui komunikasi USB.



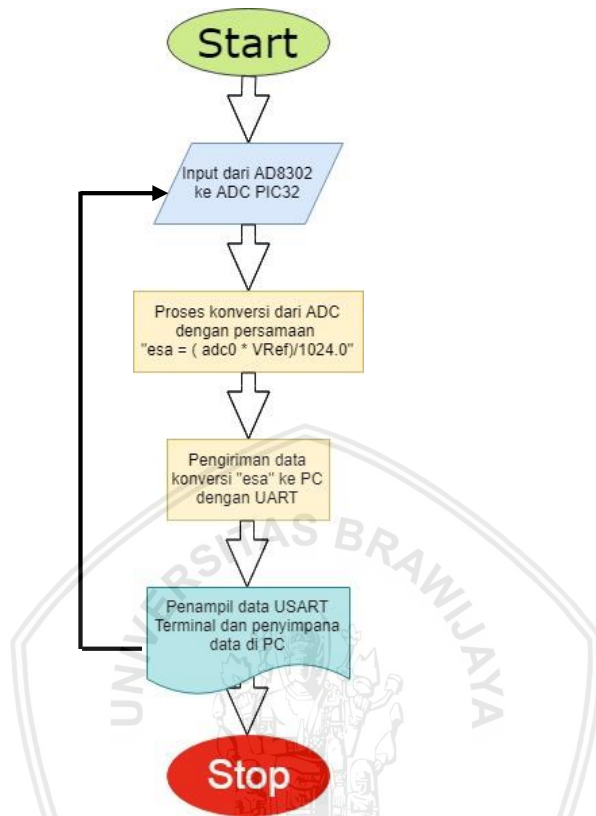
Gambar 3. 8 Perangkaian sistem pengukuran impedansi



Gambar 3. 9 Diagram blok sistem pengukuran impedansi

3.3.5 Pembuatan Program

Program dalam topik ini digunakan untuk mengatur *input* dari sinyal yang masuk ke mikrokontroler. *Input* yang masuk akan diproses sehingga akan muncul hasil dari pengukuran impedansi. Kemudian hasil tersebut akan dikeluarkan menuju PC, didalam PC hasil tersebut akan diproses dengan Delphi. Dari delphi ini akan ditampilkan hasil dari pengukuran impedansi termasuk bentuk sinyal dari masukan.



Gambar 3. 10 Flow chart progam pengukuran impedansi

3.3.6 Pembuatan *Casing*

Diperlukan bahan yang ringan untuk membuat casing yang mudah dibawa. Sehingga instrumen dapat dibawa dimana saja, dan tidak membuat *user* kesusahan.

3.3.7 Penulisan Laporan

Penulisan laporan dilakukan setelah semua tahapan dalam pembuatan dan kalibrasi telah selesai dilakukan, maka tahapan terakhir dalam penelitian ini adalah menyusun laporan. Dimana penulisan laporan akan menjadi tahap akhir dari skripsi dan

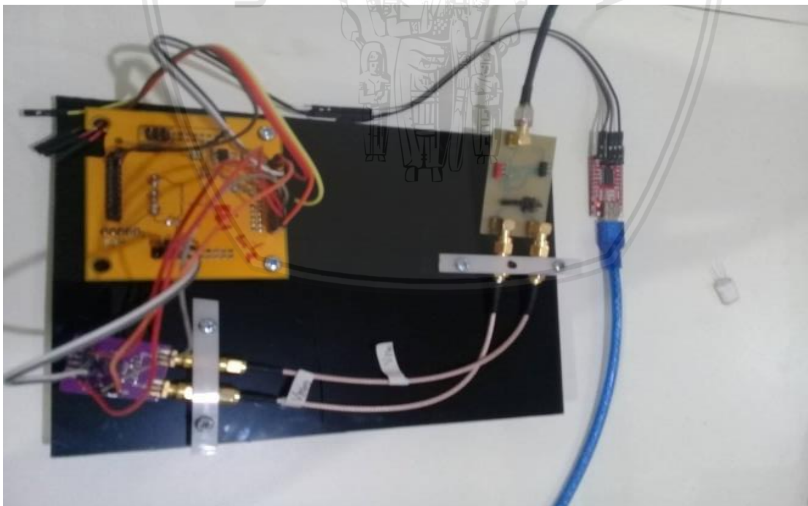
harapannya dapat digunakan sebagai referensi bagi mahasiswa yang lain.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Rancangan Sistem Pengukuran

Hasil rancangan dari rancang bangun sistem pengukuran *gain* dan beda fase sinyal pada *Quartz Crystal Microbalance* menggunakan modul PIC32MX460F512L ditunjukkan pada gambar 4.1. Sistem pengukuran ini mempunyai 5 bagian atau sub sistem didalamnya, yaitu *signal generator*, rangkaian DUT, sensor AD8302, sistem minimum mikrokontroler PIC32, dan komputer. Pada penelitian ini, fungsi utama dari *signal generator* adalah untuk membangkitkan atau menghasilkan berbagai bentuk sinyal dengan frekuensi dan amplitudo yang bermacam-macam bergantung pada batas kemampuan *signal generator* yang digunakan. Pada penelitian ini bentuk dari sinyal yang akan *diinputkan* kedalam sistem pengukuran adalah sinyal sinus dengan frekuensi yang telah dicocokkan pada referensi QCM yang diukur terlebih dahulu di *Bode 100*. *Output* dari *signal generator* akan dikoneksikan dengan *input* pada rangkaian DUT.



Gambar 4. 1 Hasil rancangan sistem pengukuran impedansi

Pada sub sistem kedua digunakan rangkaian DUT (*Device Under Test*), rangkaian DUT ini berfungsi sebagai tempat pengujian

repository.ub.ac.id

dan pengukuran QCM. Di dalam rangkaian DUT terdapat IC Op-Amp OP820 yang berfungsi sebagai *buffer amplifier* dan *non-inverting amplifier*, namun fungsi utamanya pada sistem pengukuran ini sebagai *buffer amplifier*. OPA820 membutuhkan dua sumber tegangan yaitu +5 Volt dan -5 Volt. Pada rangkaian DUT digunakan referensi resistor dengan nilai 100 Ohm, nilai sebesar ini digunakan agar hasil dari pengukuran sesuai dengan referensi pengukuran dengan *Bode 100*.

Pada sub sistem ketiga, digunakan modul sensor AD8302. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi *gain* dan beda fase pada objek yang diukur. Pada penelitian ini, AD8302 digunakan untuk mendeteksi *gain* dan beda fase dari QCM. Di mana AD8302 mempunyai dua *output* berupa tegangan, yaitu tegangan magnitudo (V_{Mag}) dan tegangan fase (V_{Pha}). Output dari AD8302 akan menuju ke PIC32 melalui *analog input* yang tersedia di PIC32.

Pada sub sistem keempat menggunakan sistem minimum dengan PIC32MX460F512L sebagai mikrokontrolernya. Fungsi dari sistem minimum PIC32 ini adalah sebagai penerima data dari sensor AD8302. Pengolahan data dari AD8302 yang berbentuk sinyal *analog* (tegangan) akan dirubah menjadi data digital (tegangan) dengan memanfaatkan fitur *Analog-Digital Converter*. ADC pada PIC32 memiliki jumlah bit sebanyak 10 Bit ADC yang terletak pada 16 kanalnya. Konfigurasi pin yang digunakan pada PIC32 sebagai input ADC adalah pin AN2 (analog 2) dan AN3 (analog 3). Fitur utama ADC yang ada di PIC32 ini yaitu *sampling rate* yang mencapai 1000 ksp/s (*kilo sampling per second*) untuk konversinya. Data hasil konfersi dari ADC akan dikirimkan ke komputer melalui fitur UART yang diberikan oleh PIC32. UART yang digunakan adalah UART 2, pin yang digunakan hanya pin untuk transmit data, yaitu pada pin U2TX.

Pada sub sistem kelima digunakan komputer untuk mengolah data dari sistem minimum PIC32. Data yang diterima berupa tegangan dalam bentuk teks, dari data bentuk teks dapat diolah oleh Excel untuk melakukan perhitungan agar dapat diketahui impedansi QCM yang digunakan dan dapat membuat grafik hubungan antara frekuensi yang diberikan pada QCM dan impedansi yang dihasilkan oleh QCM.

4.2 Pengujian Sistem Pengukuran

4.2.1. Pengujian Sistem Minimum PIC32MX460F512L

Pengujian sistem minimum dilakukan dengan menguji nyala LED pada tiap *port analog* dan pada *port* UART yang disediakan. Pengujian sistem minimum ini bertujuan agar dapat mengetahui apakah port dan sistem minimum yang digunakan dapat berfungsi dengan maksimal. Pengujian menggunakan LED yang dihubungkan dengan resistor, kemudian *port-port* pada sistem minimum diberikan perintah untuk memberikan nilai tinggi atau ON. Pada pemrogramannya tiap *port* yang digunakan diprogram untuk menjadi *output* dengan cara diberikan logika 0. Setelah itu masing-masing *port* diberikan logika 0 agar LED dapat menyala. Setelah pengujian LED maka tiap *port* diukur nilainya. Jika, port dalam keadaan LED menyala, maka tegangan pada *port* harus 3,3 Volt. Dan ketika LED mati maka tegangan pada *port* harus 0 Volt. Hasil pengujian sistem minimum dengan menggunakan indikator LED sesuai dengan yang diharapkan, yaitu semua *port* dari mikrokontroler dapat digunakan. Hasil dari pengujian membuktikan bahwa rangkaian sistem minimum mikrokontroler PIC32MX460F512L dapat digunakan. Program yang diberikan sebagai berikut.

```
char counter;

void main() {
    AD1PCFG = 0xFFFF; // semua pin output digital
    JTAGEN_bit = 0;    // Disable JTAG

    TRISB = 0;        // set untuk output
    TRISF = 0;        // set untuk output

    LATB = 0;         // aktifasi LED off
    LATF = 0;         // aktifasi LED off

    counter = 0;
    while(1) {
        // LED ON
        for (counter = 0; counter < 4; counter++){
```

```

LATB |= 0x8888 >> counter;
LATF |= 0x8888 >> counter;
Delay_ms(100);
}
// LED OFF
for (counter = 0; counter < 4; counter++){
LATB &= 0x7777 >> counter;
LATF &= 0x7777 >> counter;
Delay_ms(100);
}
}
}

```

Tabel 4. 1 Hasil uji sistem minimum

Port	Nilai hexa	Indikator Led
		ON/OFF
PORT B	8888	ON
PORT F	8888	ON
PORT B	7777	OFF
PORT F	7777	OFF

4.2.2. Pengujian UART PIC32MX460F512L

Pada pengujian UART dilakukan dengan cara mengirimkan karakter dari PC menuju sistem minimum PIC32 dan kemudian dari sistem minimum dikirimkan kembali menuju PC. Program yang dibuat telah dilampirkan pada [1]. Pada pengujian PIC32 digunakan *port F* untuk UART2 pada sistem minimum, dimana pin yang digunakan dalam *port F* adalah pin U2TX (RF5) dan pin U2RX (RF4). Fungsi dari pin U2TX adalah untuk mentransmisikan atau mengirimkan data dari sistem minimum PIC32, sedangkan pin U2RX berfungsi untuk menerima data dari PC. Pemrograman yang dilakukan sebagai berikut.

```
char uart_rd;
```

```

void main() {
CHECON = 30;
AD1PCFG = 0xFFFF;

```



```

UART1_Init(19200); // Initialize UART at 19200 bps
Delay_ms(100);    // Wait for UART module to stabilize

UART1_Write_Text("Start");
UART1_Write(13);
UART1_Write(10);

while (1) { // Endless loop
    if (UART1_Data_Ready()==1) { // If data is received
        uart_rd = UART1_Read(); // read the received data
        UART1_Write(uart_rd); // and send data via UART
    }
}
}

```

4.2.3. Pengujian Rangkaian DUT

Pengujian rangkaian DUT dilakukan untuk mengetahui apakah DUT dapat berkerja dengan baik. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan sinyal masukan pada *input* rangkaian DUT. Kemudian *output* V_1 pada DUT akan disambungkan ke osiloskop. DUT yang baik adalah ketika frekuensi dan amplitudo masukannya sama dengan keluarannya.

4.2.4. Pengujian Sistem Pengukuran

Pengujian sistem pengukuran impedansi dengan PIC32MX460F512L dilakukan dengan mengukur *output* dan *input* pada *subsistem* yang digunakan. Terdapat dua sub sistem yang diuji dengan mencocokkan nilai tegangannya, yaitu pada keluaran AD8302 dan masukan pada *port* ADC PIC32MX460F512L, selain itu nilai tegangan juga dicocokkan dengan hasil dari pengukuran pada pemrogaman yang akan ditampilkan pada *serial monitor*. Jika ketiga nilai tegangan tersebut cocok, maka dapat dikatakan bahwa sistem pengukuran dapat bekerja secara baik.

4.3 Pengambilan Data Impedansi

Pengambilan data impedansi dilakukan dengan menggunakan sensor QCM dengan frekuensi natural 10 MHz. Terdapat tiga sensor QCM yang digunakan, yaitu sensor QCM dengan kode E43, E46 dan E94. Sebelum dilakukan pengukuran dengan sistem pengukuran

impedansi PIC32, ketiga sensor QCM tersebut diukur dengan *Impedance Analyzer* Bode 100. Setelah diketahui nilai impedansinya, maka dipilih impedansi terkecil untuk diukur dengan sistem pengukuran PIC32. Lalu diberikan iterasi frekuensi sebanyak 41 data pada impedansi terkecil, dengan 20 data pada nilai frekuensi yang lebih kecil dari frekuensi nilai impedansi *minimum* dan 20 data pada frekuensi yang lebih besar dari frekuensi nilai impedansi *minimum*.

Dari data yang didapat melalui pengukuran yang berupa nilai tegangan dari pin V_{mag} AD8302, maka dapat digunakan persamaan yang telah disediakan oleh *data sheet* AD8302 yaitu:

$$V_{mag} = 20 \times \log \left(\frac{V_a}{V_b} \right)$$

Setelah nilai dari $\frac{V_a}{V_b}$ diketahui, maka dapat digunakan persamaan *Voltage Divider* atau pembagi tegangan sehingga dapat diketahui nilai impedansi pada titik Z yang akan diukur. Persamaan yang digunakan yaitu:

$$V_b = \left(\frac{R_f}{Z + R_f} \right) \times V_a$$

$$Z + R_f = \left(\frac{R_f \times V_a}{V_b} \right)$$

Maka akan didapatkan persamaan untuk mencari Z, yaitu:

$$Z = \left(R_f \times \left(\frac{V_a}{V_b} \right) \right) - R_f$$

Dimana nilai dari R_f atau reference resistornya telah *fix*kan dengan nilai 100 Ohm.

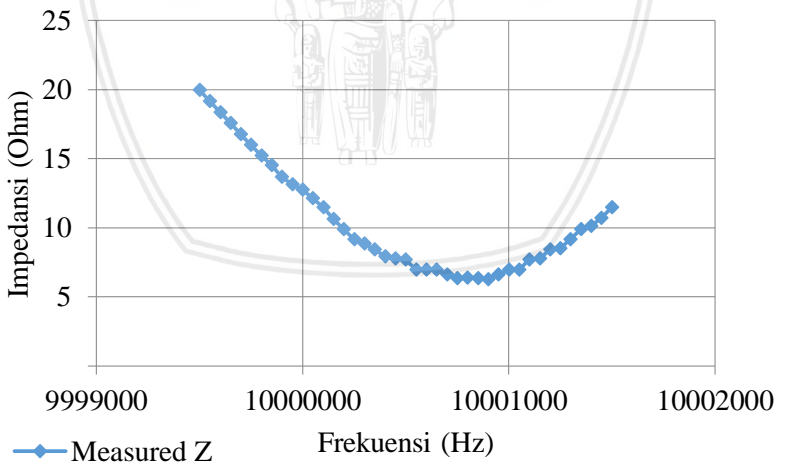
4.3.1. Pengukuran QCM E43 dengan Rentang 50 Hz

Pengukuran impedansi untuk sensor QCM kode E43 dengan rentang 50 Hz, dilakukan dari frekuensi 9999500 Hz hingga 10001500 Hz. Dari pengukuran yang dilakukan didapatkan 41 buah data, dalam tabel dibawah ini akan ditampilkan 10 sampel data seperti berikut.

Tabel 4. 2 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya

No	Frekuensi	$Z_{\text{Pengukuran}}$	Z_{Abs}	Deviasi
1	9.999.600	18,3701	129,8309	78,8147
2	9.999.800	15,2188	104,4437	63,0915
3	10.000.000	12,7583	75,9924	44,6638
4	10.000.200	9,9045	50,8180	28,9302
5	10.000.400	7,9209	25,9510	12,7492
6	10.000.600	6,9786	6,9406	0,0269
7	10.000.800	6,4028	33,2197	18,9624
8	10.001.000	6,9786	71,8758	45,8893
9	10.001.200	8,4317	94,7393	61,0287
10	10.001.400	9,9045	118,1088	76,5119

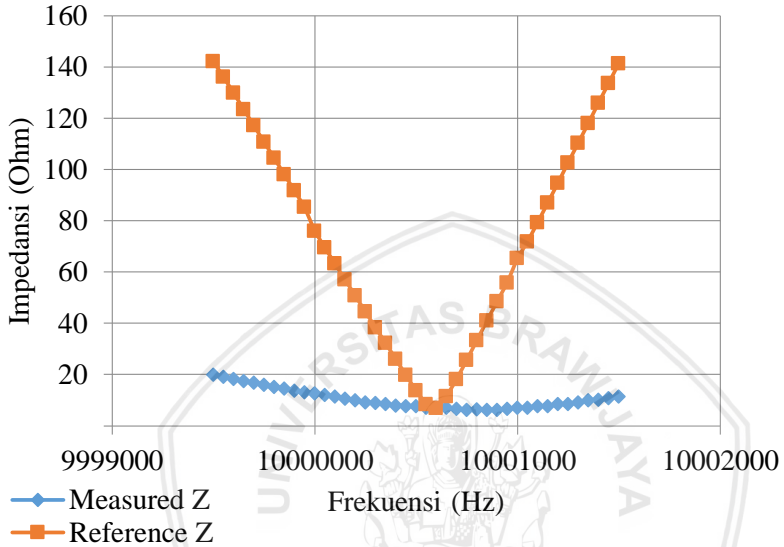
Tabel 4. 2 merupakan tabel pengambilan data impedansi pada QCM E43 direntang 50 Hertz diukur dengan sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan dibandingkan dengan data impedansi yang diukur dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Data yang ditampilkan pada tabel 4. 2 hanya 10 data dari 41 data yang diambil pada pengukuran impedansi dengan sistem pengukuran yang dibuat.



Gambar 4. 2 Grafik pengukuran impedansi pada QCM E43

Gambar 4. 2 merupakan grafik pengukuran impedansi yang diukur oleh sistem pengukuran impedansi yang dikembangkan oleh

penulis. Pada frekuensi terendah yang diberikan yaitu 9999500 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 19,978 Ohm, sedangkan pada frekuensi tertinggi yaitu 10001500 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 11,4726 Ohm. Impedansi minimum yang didapatkan pada sensor QCM E43 sebesar 6,2594 Ohm.



Gambar 4. 3 Perbandingan antara impedansi QCM E43 yang diukur dengan referensinya

Gambar 4. 3 merupakan grafik perbandingan pengukuran impedansi sensor QCM E43 antara sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Didapatkan perbedaan pengukuran pada frekuensi minimum yang diberikan yaitu hasil yang didapat dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 19,978 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 142,2711 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi minimum sebesar 86,4743. Pengukuran pada frekuensi maksimum didapatkan dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 11,4726 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 141,3407 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi maksimum sebesar 91,8307.

Terdapat dua nilai impedansi minimum berdasarkan alat pengukuran yang digunakan, yaitu impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan impedansi minimum pada kalibrator, sehingga didapatkan dua perbandingan impedansi minimum. Pada frekuensi 10000900 Hertz impedansi minimum disistem pengukuran yang dikembangkan didapat sebesar 6,2594 Ohm, sedangkan pada kalibrator impedansi minimum yang didapat sebesar 48,5468 Ohm, sehingga deviasi pengukuran sebesar 29,9017. Sedangkan pada frekuensi 10000600 Hertz impedansi minimum yang didapat dari kalibrator sebesar 6,9406 Ohm, untuk impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan hasil yang didapat sebesar 6,9786 Ohm, hasil deviasi dari dua pengukuran impedansi minimum ini sebesar 0,0269.

4.3.2. Pengukuran QCM E43 dengan Rentang 100 Hz

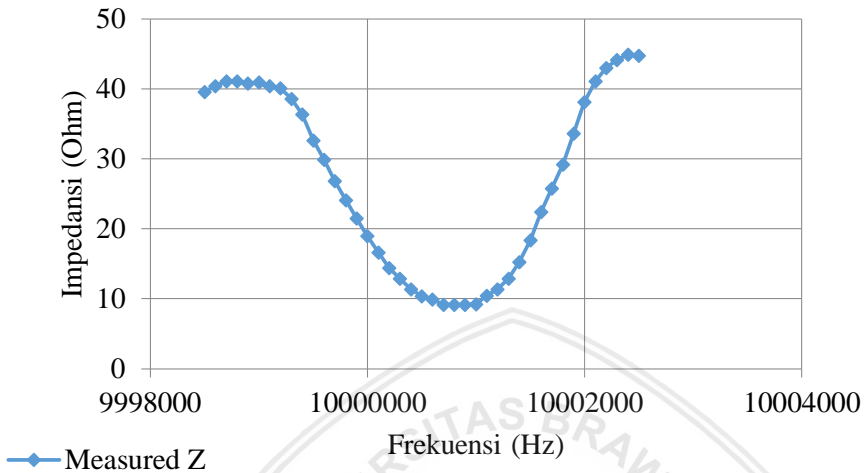
Pengukuran impedansi untuk sensor QCM kode E43 dengan rentang 100 Hz, dilakukan dari frekuensi 9998500 Hz hingga 10002500 Hz.

Tabel 4. 3 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya

No	Frekuensi	$Z_{\text{Pengukuran}}$	Z_{Abs}	Deviasi
1	9998900	40,7781	218,538	125,8478
2	9999300	38,6107	166,3255	90,3080
3	9999700	26,8017	117,1474	63,8841
4	10000100	16,6264	63,3312	33,0253
5	10000500	10,3503	13,6788	2,3536
6	10000900	9,1656	48,5468	27,8467
7	10001300	12,9105	110,3335	68,8885
8	10001700	25,7794	172,3535	103,6435
9	10002100	41,0633	239,1187	140,0463
10	10002500	44,7261	304,1354	183,4300

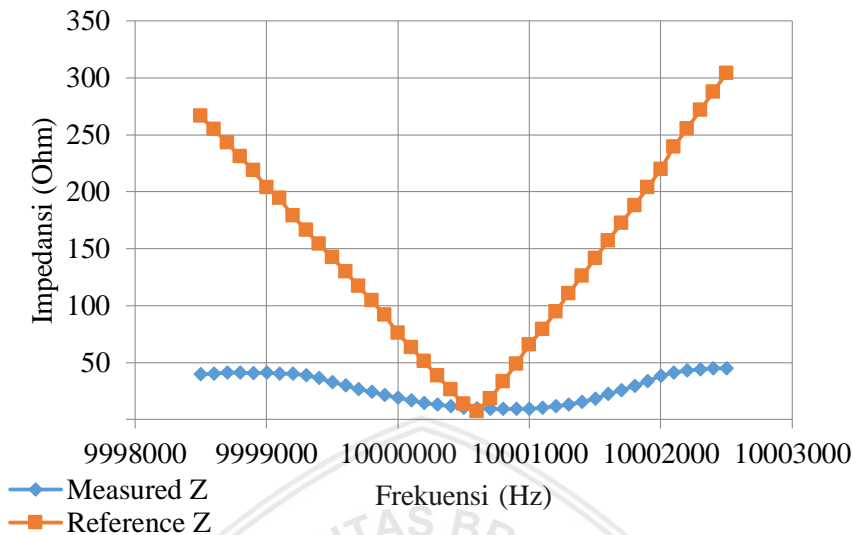
Tabel 4. 3 merupakan tabel pengambilan data impedansi pada QCM E43 direntang 100 Hertz diukur dengan sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan dibandingkan dengan data impedansi yang diukur dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Data yang ditampilkan pada tabel 4. 3 hanya 10 data dari

41 data yang diambil pada pengukuran impedansi dengan sistem pengukuran yang dibuat.



Gambar 4. 4 Pengukuran impedansi pada QCM E43

Gambar 4. 4 merupakan grafik pengukuran impedansi yang diukur oleh sistem pengukuran impedansi yang dikembangkan oleh penulis. Pada frekuensi terendah yang diberikan yaitu 9998500 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 39,5489 Ohm, sedangkan pada frekuensi tertinggi yaitu 10002500 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 44,7261 Ohm. Impedansi minimum yang didapatkan pada sensor QCM E43 sebesar 9,1656 Ohm.



Gambar 4. 5 Perbandingan antara impedansi QCM E43 yang diukur dengan referensinya

Gambar 4. 5 merupakan grafik perbandingan pengukuran impedansi sensor QCM E43 antara sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Didapatkan perbedaan pengukuran pada frekuensi minimum yang diberikan yaitu hasil yang didapat dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 39,5489 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 266,5334 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi minimum sebesar 160,5023. Pengukuran pada frekuensi maksimum didapatkan dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 44,7261 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 304,1354 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi maksimum sebesar 183,43.

Terdapat dua nilai impedansi minimum berdasarkan alat pengukuran yang digunakan, yaitu impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan impedansi minimum pada kalibrator, sehingga didapatkan dua perbandingan impedansi minimum. Pada frekuensi 10000700 Hertz impedansi minimum disistem pengukuran yang dikembangkan didapat sebesar 9,1656 Ohm, sedangkan pada kalibrator impedansi minimum yang didapat sebesar 18,1789 Ohm, sehingga deviasi pengukuran sebesar

6,3733. Sedangkan pada frekuensi 10000600 Hertz impedansi minimum yang didapat dari kalibrator sebesar 6,9406 Ohm, untuk impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan hasil yang didapat sebesar 9,9045 Ohm, hasil deviasi dari dua pengukuran impedansi minimum ini sebesar 2,0958.

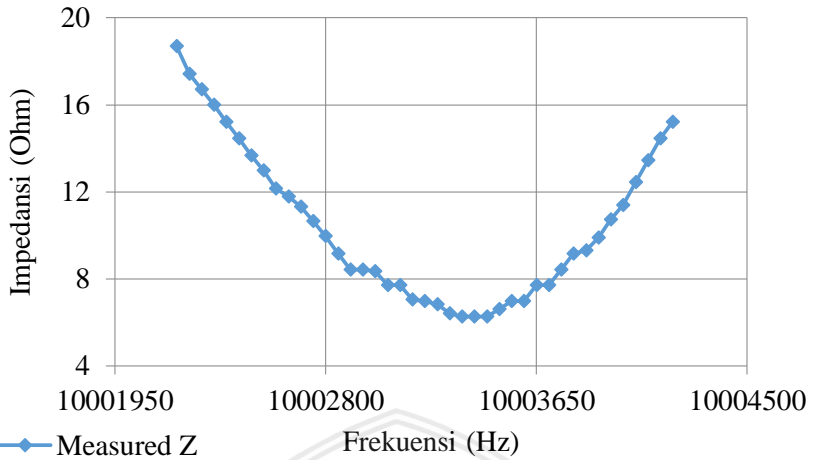
4.3.3. Pengukuran QCM E46 dengan Rentang 50 Hz

Pengukuran impedansi untuk sensor QCM kode E46 dengan rentang 50 Hz, dilakukan dari frekuensi 10002200 Hz hingga 10004200 Hz.

Tabel 4. 4 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya

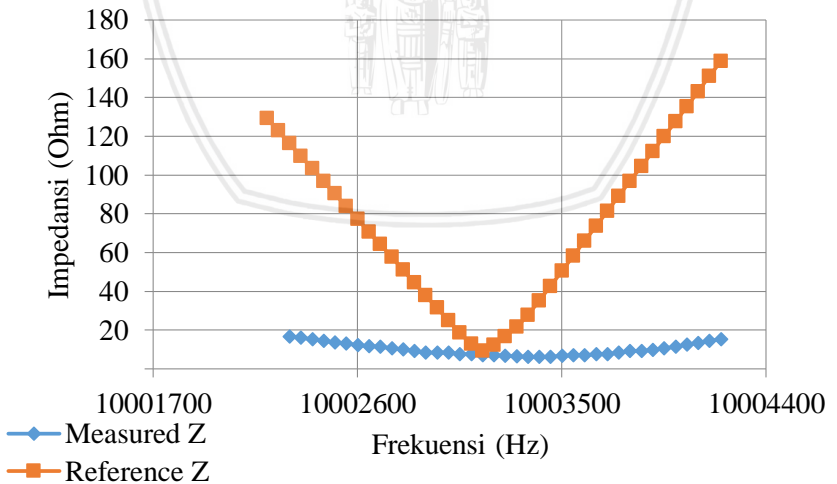
No	Frekuensi	$Z_{\text{Pengukuran}}$	Z_{Abs}	Deviasi
1	10002400	15,2188	103,2794	62,2682
2	10002600	12,1514	77,2819	46,0543
3	10002800	9,9787	51,0600	29,0488
4	10003000	8,3586	24,8798	11,6823
5	10003200	6,9786	12,3388	3,7902
6	10003400	6,2594	34,9929	20,3177
7	10003600	6,9786	65,9724	41,7149
8	10003800	9,1656	96,8408	61,9957
9	10004000	11,3974	127,6249	82,1853
10	10004200	15,2188	158,6339	101,4098

Tabel 4, 4 merupakan tabel pengambilan data impedansi pada QCM E46 direntang 50 Hertz diukur dengan sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan dibandingkan dengan data impedansi yang diukur dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Data yang ditampilkan pada tabel 4, 4 hanya 10 data dari 41 data yang diambil pada pengukuran impedansi dengan sistem pengukuran yang dibuat.



Gambar 4. 6 Pengukuran impedansi pada QCM E46

Gambar 4. 6 merupakan grafik pengukuran impedansi yang diukur oleh sistem pengukuran impedansi yang dikembangkan oleh penulis. Pada frekuensi terendah yang diberikan yaitu 10002200 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 18,69 Ohm, sedangkan pada frekuensi tertinggi yaitu 10004200 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 15,2188 Ohm. Impedansi minimum yang didapatkan pada sensor QCM E43 sebesar 6,2594 Ohm.



Gambar 4. 7 Perbandingan antara impedansi QCM E46 yang diukur dengan referensinya

Gambar 4. 7 merupakan grafik perbandingan pengukuran impedansi sensor QCM E46 antara sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Didapatkan perbedaan pengukuran pada frekuensi minimum yang diberikan yaitu hasil yang didapat dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 18,69 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 129,2501 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi minimum sebesar 78,1778. Pengukuran pada frekuensi maksimum didapatkan dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 15,2188 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 158,6339 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi maksimum sebesar 101,4098.

Terdapat dua nilai impedansi minimum berdasarkan alat pengukuran yang digunakan, yaitu impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan impedansi minimum pada kalibrator, sehingga didapatkan dua perbandingan impedansi minimum. Pada frekuensi 10003350 Hertz impedansi minimum disistem pengukuran yang dikembangkan didapat sebesar 6,2594 Ohm, sedangkan pada kalibrator impedansi minimum yang didapat sebesar 27,7788 Ohm, sehingga deviasi pengukuran sebesar 15,2165. Sedangkan pada frekuensi 10003150 Hertz impedansi minimum yang didapat dari kalibrator sebesar 9,2014 Ohm, untuk impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan hasil yang didapat sebesar 7,0508 Ohm, hasil deviasi dari dua pengukuran impedansi minimum ini sebesar 1,5207.

4.3.4. Pengukuran QCM E46 dengan Rentang 100 Hz

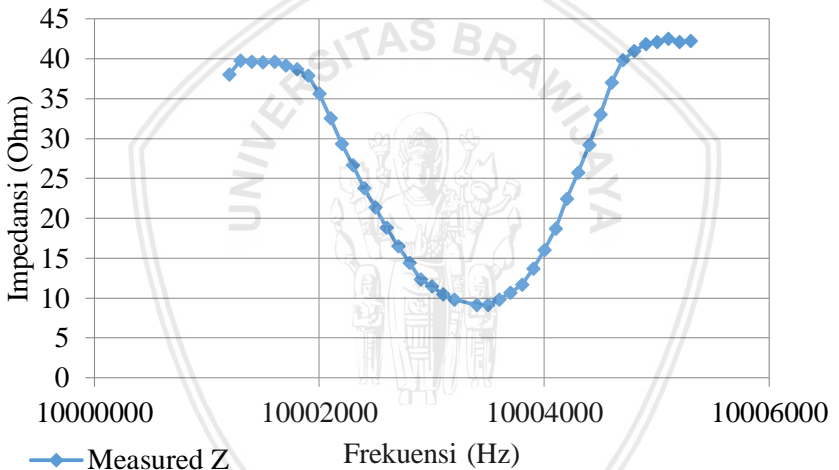
Pengukuran impedansi untuk sensor QCM kode E43 dengan rentang 100 Hz, dilakukan dari frekuensi 10001200 Hz hingga 10005300 Hz.

Tabel 4. 5 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya

No	Frekuensi	$Z_{\text{Pengukuran}}$	Z_{Abs}	Deviasi
1	10001600	39,6431	208,5277	119,4195
2	10002000	35,6506	158,1855	86,6452
3	10002400	23,7594	103,2794	56,2292
4	10002800	14,4442	51,05996	25,8913
5	10003200	9,8304	10,41186	0,4111

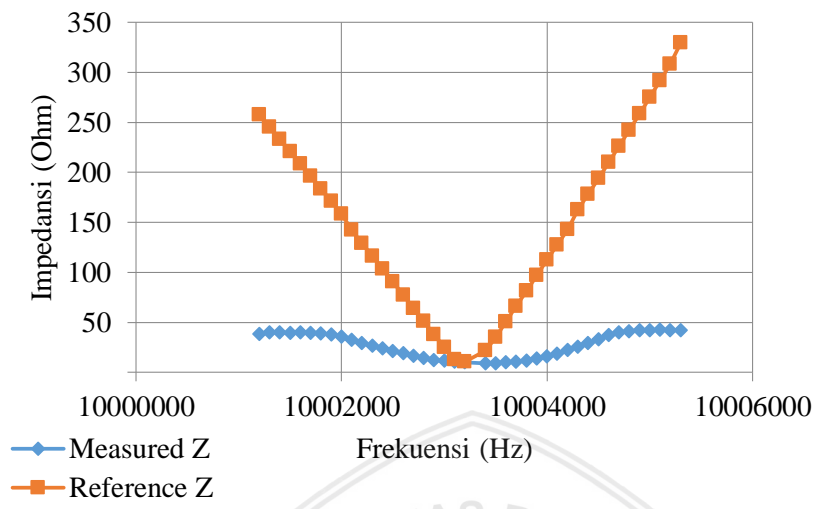
6	10003600	10,6484	65,97241	39,1200
7	10004000	18,6900	127,6249	77,0286
8	10004400	33,0227	194,013	113,8374
9	10004800	41,8266	258,4609	153,1836
10	10005200	42,2098	329,3704	203,0532

Tabel 4. 5 merupakan tabel pengambilan data impedansi pada QCM E46 direntang 100 Hertz diukur dengan sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan dibandingkan dengan data impedansi yang diukur dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Data yang ditampilkan pada tabel 4, 5 hanya 10 data dari 41 data yang diambil pada pengukuran impedansi dengan sistem pengukuran yang dibuat.



Gambar 4. 8 Pengukuran impedansi pada QCM E46

Gambar 4. 8 merupakan grafik pengukuran impedansi yang diukur oleh sistem pengukuran impedansi yang dikembangkan oleh penulis. Pada frekuensi terendah yang diberikan yaitu 10001200 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 38,0508 Ohm, sedangkan pada frekuensi tertinggi yaitu 10005200 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 42,2098 Ohm. Impedansi minimum yang didapatkan pada sensor QCM E43 sebesar 9,1656 Ohm.



Gambar 4. 9 Perbandingan antara impedansi QCM E46 yang diukur dengan referensinya

Gambar 4. 9 merupakan grafik perbandingan pengukuran impedansi sensor QCM E46 antara sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Didapatkan perbedaan pengukuran pada frekuensi minimum yang diberikan yaitu hasil yang didapat dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 38,0508 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 257,4176 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi minimum sebesar 155,1158. Pengukuran pada frekuensi maksimum didapatkan dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 42,2098 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 329,3704 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi maksimum sebesar 203,0532.

Terdapat dua nilai impedansi minimum berdasarkan alat pengukuran yang digunakan, yaitu impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan impedansi minimum pada kalibrator, sehingga didapatkan dua perbandingan impedansi minimum. Pada frekuensi 10003300 Hertz impedansi minimum disistem pengukuran yang dikembangkan didapat sebesar 9,1656 Ohm, sedangkan pada kalibrator impedansi minimum yang didapat sebesar 21,56103 Ohm, sehingga deviasi pengukuran sebesar 8,7649. Sedangkan pada frekuensi 10003200 Hertz impedansi

minimum yang didapat dari kalibrator sebesar 10,41186 Ohm, untuk impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan hasil yang didapat sebesar 9,8304 Ohm, hasil deviasi dari dua pengukuran impedansi minimum ini sebesar 0,4111.

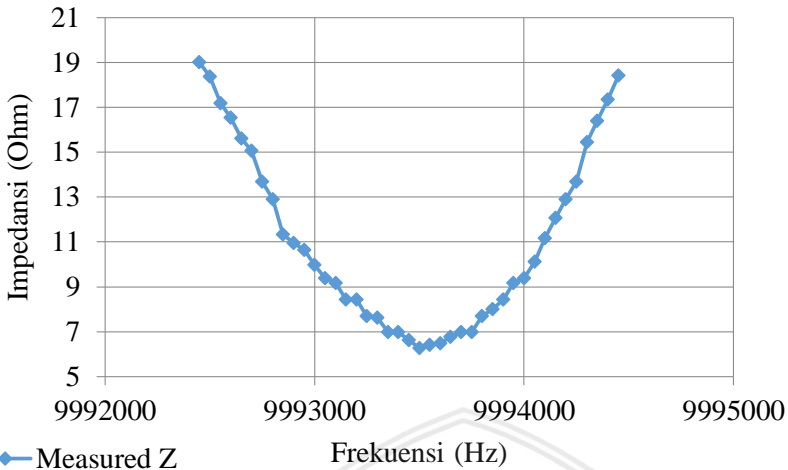
4.3.5. Pengukuran QCM E94 dengan Rentang 50 Hz

Pengukuran impedansi untuk sensor QCM kode E94 dengan rentang 50 Hz, dilakukan dari frekuensi 9992450 Hz hingga 9994400 Hz.

Tabel 4. 6 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya

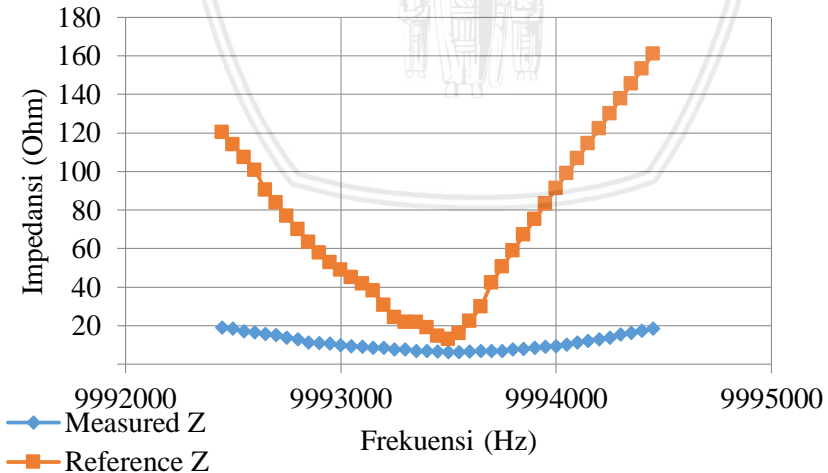
No	Frekuensi	$Z_{\text{Pengukuran}}$	Z_{Abs}	Deviasi
1	9992600	16,5478	97,3169	57,1124
2	9992800	12,9105	69,8707	40,2769
3	9993000	9,9787	48,9565	27,5615
4	9993200	8,4317	30,6546	15,7139
5	9993400	6,9786	12,8549	4,15520
6	9993600	6,4746	22,3401	11,2186
7	9993800	7,7027	58,9773	36,2566
8	9994000	9,3868	91,1445	57,8114
9	9994200	12,9105	122,2954	77,3469
10	9994400	17,3366	153,2866	96,1311

Tabel 4. 6 merupakan tabel pengambilan data impedansi pada QCM E94 direntang 50 Hertz diukur dengan sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan dibandingkan dengan data impedansi yang diukur dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Data yang ditampilkan pada tabel 4, 6 hanya 10 data dari 41 data yang diambil pada pengukuran impedansi dengan sistem pengukuran yang dibuat.



Gambar 4. 10 Pengukuran impedansi pada QCM E94

Gambar 4. 10 merupakan grafik pengukuran impedansi yang diukur oleh sistem pengukuran impedansi yang dikembangkan oleh penulis. Pada frekuensi terendah yang diberikan yaitu 9992450 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 19,0107 Ohm, sedangkan pada frekuensi tertinggi yaitu 9994450 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 18,4277 Ohm. Impedansi minimum yang didapatkan pada sensor QCM E43 sebesar 6,2594 Ohm.



Gambar 4. 11 Perbandingan antara impedansi QCM E94 yang diukur dengan referensinya

Gambar 4. 11 merupakan grafik perbandingan pengukuran impedansi sensor QCM E46 antara sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Didapatkan perbedaan pengukuran pada frekuensi minimum yang diberikan yaitu hasil yang didapat dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 19,0107 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 120,3890 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi minimum sebesar 71,6853. Pengukuran pada frekuensi maksimum didapatkan dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 18,4277 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 161,0460 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi maksimum sebesar 100,8464.

Terdapat dua nilai impedansi minimum berdasarkan alat pengukuran yang digunakan, yaitu impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan impedansi minimum pada kalibrator, sehingga didapatkan dua perbandingan impedansi minimum. Pada frekuensi 9993500 Hertz impedansi minimum disistem pengukuran yang dikembangkan didapat sebesar 6,2594 Ohm, sedangkan pada kalibrator impedansi minimum yang didapat sebesar 13,8308 Ohm, sehingga deviasi pengukuran sebesar 5,3538. Sedangkan pada frekuensi 9993400 Hertz impedansi minimum yang didapat dari kalibrator sebesar 12,8549 Ohm, untuk impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan hasil yang didapat sebesar 6,9786 Ohm, hasil deviasi dari dua pengukuran impedansi minimum ini sebesar 4,1552.

4.3.6. Pengukuran QCM E94 dengan Rentang 100 Hz

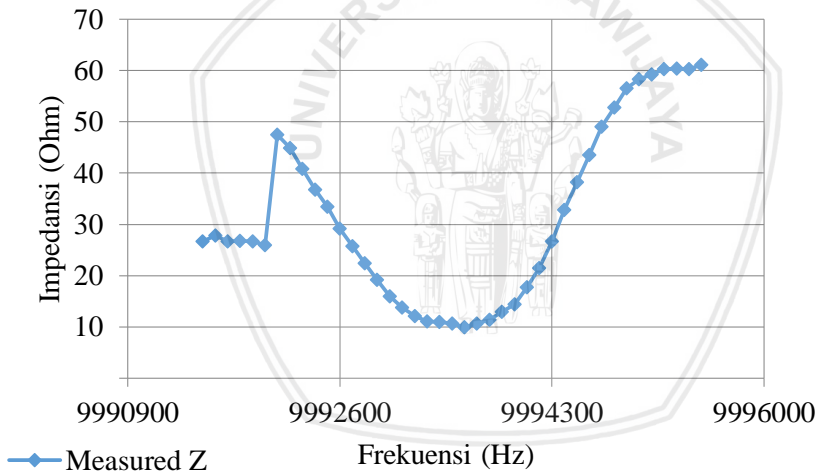
Pengukuran impedansi untuk sensor QCM kode E43 dengan rentang 50 Hz, dilakukan dari frekuensi 9991500 Hz hingga 9995400 Hz.

Tabel 4. 7 Perbandingan pengukuran impedansi serta deviasinya

No	Frekuensi	Z _{Pengukuran}	Z _{Absolut}	Deviasi
1	9991800	26,80166	202,5301	124,2588
2	9992200	44,92149	152,6043	76,1432
3	9992600	29,21951	97,31694	48,1522
4	9993000	15,9987	48,95654	23,3047

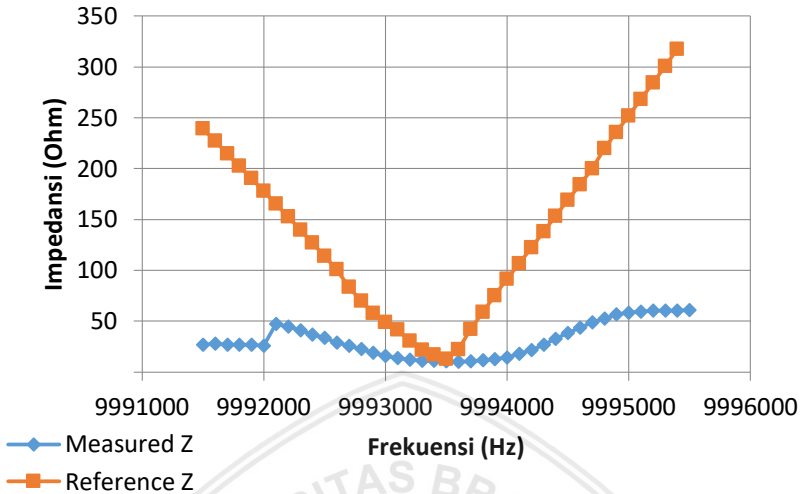
5	9993400	10,94741	12,85493	1,34882
6	9993800	11,39739	58,97726	33,6441
7	9994200	21,52565	122,2954	71,2550
8	9994600	43,55926	184,3844	99,5784
9	9995000	58,31121	251,685	136,7359
10	9995400	60,24524	317,1513	181,66

Tabel 4. 7 merupakan tabel pengambilan data impedansi pada QCM E94 direntang 100 Hertz diukur dengan sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan dibandingkan dengan data impedansi yang diukur dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Data yang ditampilkan pada tabel 4, 6 hanya 10 data dari 41 data yang diambil pada pengukuran impedansi dengan sistem pengukuran yang dibuat.



Gambar 4. 12 Pengukuran impedansi pada QCM E94

Gambar 4. 12 merupakan grafik pengukuran impedansi yang diukur oleh sistem pengukuran impedansi yang dikembangkan oleh penulis. Pada frekuensi terendah yang diberikan yaitu 9991500 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 26,6307 Ohm, sedangkan pada frekuensi tertinggi yaitu 9995500 Hertz didapatkan hasil impedansi sebesar 61,11085 Ohm. Impedansi minimum yang didapatkan pada sensor QCM E43 sebesar 9,9045 Ohm.



Gambar 4. 13 Perbandingan antara impedansi QCM E94 yang diukur dengan referensinya

Gambar 4. 13 merupakan grafik perbandingan pengukuran impedansi sensor QCM E94 antara sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dengan kalibrator yaitu *Impedance Analyzer Bode 100*. Didapatkan perbedaan pengukuran pada frekuensi minimum yang diberikan yaitu hasil yang didapat dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 26,6307 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 241,9607 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi minimum sebesar 152,2613. Pengukuran pada frekuensi maksimum didapatkan dengan sistem pengukuran ini impedansi yang didapat 61,1108 Ohm, sedangkan pada *Impedance Analyzer Bode 100* didapat 333,8937 Ohm, sehingga deviasi pengukuran pada frekuensi maksimum sebesar 192,8866.

Terdapat dua nilai impedansi minimum berdasarkan alat pengukuran yang digunakan, yaitu impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan oleh penulis dan impedansi minimum pada kalibrator, sehingga didapatkan dua perbandingan impedansi minimum. Pada frekuensi 9993500 Hertz impedansi minimum disistem pengukuran yang dikembangkan didapat sebesar 6,2594 Ohm, sedangkan pada kalibrator impedansi minimum yang didapat sebesar 13,8308 Ohm, sehingga deviasi pengukuran sebesar

5,3538. Sedangkan pada frekuensi 9993400 Hertz impedansi minimum yang didapat dari kalibrator sebesar 12,8549 Ohm, untuk impedansi minimum pada sistem pengukuran yang dikembangkan hasil yang didapat sebesar 6,9786 Ohm, hasil deviasi dari dua pengukuran impedansi minimum ini sebesar 4,1552.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini berhasil dikembangkan sistem pengukuran impedansi pada QCM dengan metode I-V menggunakan modul PIC32MX460F512L, sistem akuisisi tegangan dari AD8302 yang merupakan sensor gain dan fase dapat dikatakan sederhana karena hanya menggunakan fitur ADC yang ada pada mikrokontroler. Deviasi atau selisih pada pengukuran impedansi minimum memiliki nilai yang kecil yaitu kurang dari lima Ohm (5Ω). Namun untuk pengukuran diatas dari impedansi minimum terdapat deviasi yang besar, ini dikarenakan karena *resistor reference* yang terlalu kecil sehingga tidak dapat mengimbangi perubahan frekuensi yang diberikan oleh *signal generator*.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya, untuk mendapatkan hasil pengukuran impedansi yang baik/mendekati hasil dari kalibrator, sebaiknya *resistor reference* yang digunakan dapat berubah-ubah nilai variabel resistornya.

Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Artanto. D. (2017). *Interface Sensor & Aktuator Menggunakan Proteus, Arduino dan Labview*. Sleman: Penerbit Deepublish.
- Casteleir_Roca. J. L., Calvo-Rolle. J. L., Meizoso-Lopez. M. C., Pinon-Pazos. A., & Rodriguez-Gomez. B. A. (2014). *Sensors and Actuators A : Physical New approach for the QCM sensors characterization*. 207. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.12.002>
- Device. A. (2002). AD8302.
- Ikhsani. R. N., & Sakti. S. P. (2017). Flow rate effect of syringe pump on quartz crystal microbalance sensor resonance frequency stability. *Proceeding - 2016 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology, ISSIMM 2016*, 107–110. <https://doi.org/10.1109/ISSIMM.2016.7803733>
- Keysight. (2016). *Keysight Impedance Measurement Handbook ed6. Measurement*. 140. <https://doi.org/10.1190/1.1441738>
- Khusnah. N. F., Sakti. S. P., & Santjojo. D. J. D. H. (2018). Monitoring of tissue oxygenation via parameters of erythropoetic activity. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 345. 871–876. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/367/1/012030>
- Lab. O. (2012). Bode 100. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2015.10.002>
- microchip. (2011). *PIC32MX3/4XX Data Sheet General Purpose and USB . 32-bit Flash Microcontrollers. Technology*.
- Pelgrom. M. (2017). *Analog-to-Digital Conversion*. Switzerland: Springer Nature.
- Sotillo. S. M. (2014). *Asynchronous Communication*. 4(1). 1–34.
- Sullivan. C. K. O., & Guilbault. G. G. (1999). Commercial quartz crystal microbalances - theory and applications. 14. 663–670.
- Toulson. R., & Wilmshurst. T. (2017). *Starting with Serial Communication. Fast and Effective Embedded Systems Design*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100880-5.00007-4>
- W. Hayt. J. Kemmerly. D. S. D. (2005). *Rangkaian Listrik Edisi Ke Enam Jilid 1. Response*. 6.
- Yohandri. & Asrizal. (2016). *Elektronika Dasar 1 Komponen. Rangkaian, dan Aplikasi*. Jakarta: Kencana.

Yonekura, T. (1994). High-Frequency Impedance Analyzer. *Hewlett-Packard Journal*. (October). 67–74.

