

Pengembangan Sistem Embedded Berbasis ARM Cortex M7 untuk Pengukuran Frekuensi Sensor QCM (*Quartz Crystal Microbalance*) Portabel

Lalu Sahrul Hudha¹, Didik R. Santoso², Setyawan P. Sakti^{3*}

Abstract— In general, measurement using QCM sensor consists of oscillator, frequency counter, power supply, computer dan monitor. The result of measurement using QCM is usually presented in graph of frequency and time that calls sensogram. In order to make the measurement system more practical, there is a need to develop an embedded system. We developed a portable system which consist of a 32-bit microcontroller, frequency counter, display and data storage. The core microcontroller for the portable system is the ARM-Cortex-M7. The developed embedded system ables to measure the frequency of the sensor, displayed the data and simultaneously store the recorded data in a microSD. These functions are developed inside STM32F746NG by using Real Time Operating System. The freeRTOS was selected as the operating system.

Intisari— Secara umum pengukuran menggunakan sensor QCM minimal terdiri dari osilator, Frequency Counter, power supply, komputer dan monitor. Hasil pengukuran menggunakan QCM biasanya disajikan dalam bentuk grafik hubungan frekuensi dan waktu yang biasa disebut sebagai sensogram. Agar sistem pengukurannya menjadi lebih praktis, maka pada penelitian ini dikembangkan sebuah sistem embedded berbasiskan mikrokontroler 32-bit berbasis ARM-Cortex-M7 yang akan mengintegrasikan perangkat pencacah frekuensi berbasis CPLD XC2C512, LCD TFT Color 4.3 inch 480x272 pixel, dan microSD. Pengembangan sistem embedded ini menghasilkan sistem pengukuran frekuensi portabel yang dapat menampilkan grafik hasil pengukuran secara real time pada LCD TFT 4.3 inch dan menyimpan hasil pengukurannya pada microSD. Fungsi-fungsi ini dikembangkan di dalam STM32F746NG dengan memanfaatkan freeRTOS yang merupakan sebuah Real Time Operating System.

Kata Kunci— QCM, CPLD, STM32F746NG, freeRTOS, embedded, portabel, LCD TFT, microSD.

I. PENDAHULUAN

Quartz Crystal Microbalance (QCM) merupakan sebuah resonator kristal kuarsa yang perubahan frekuensi resonansinya dipengaruhi oleh absorpsi materi pada permukaan elektrodanya [1]. Pergeseran frekuensi tersebut sebanding dengan penambahan massa pada permukaannya

selama massa tersebut secara kuat menempel dengan tidak terdapat deformasi dari pergerakan osilasi kristal [2]. Selain itu, QCM memiliki sensitivitas yang tinggi hingga mampu mendeteksi perubahan massa dalam orde mikrogram hingga nanogram [3]. Hal tersebut menyebabkan penelitian mengenai sensor QCM dalam berbagai aplikasi semakin pesat terutama dalam aplikasinya sebagai biosensor. Hal itu juga diikuti dengan berkembangnya metode yang digunakan dalam sistem pengukuran yang melibatkan sensor QCM seperti metode yang berbasiskan perubahan frekuensi, perubahan nilai impedansi (resistansi maupun reaktansi), perubahan arus, perubahan phase, dan perubahan nilai kualitas. Metode yang berbasiskan perubahan frekuensi merupakan metode dasar yang paling mudah diaplikasikan dalam berbagai aplikasi baik dari segi sistem pengukuran maupun analisis hasil pengukuran.

Meningkatkan selektifitas sensor QCM dapat dilakukan dengan memodifikasi permukaan sensor QCM sesuai dengan aplikasi atau target yang akan diukur seperti melapiskan polimer tertentu pada permukaan sensor QCM untuk mendeteksi kandungan gas tertentu di udara, mengimobilisasi analit tertentu untuk mendeteksi anti bodi yang bersesuaian dengan analit tersebut. Respon selektif sensor QCM tersebut dapat diamati berdasarkan perubahan frekuensi sensor QCM ketika target selektif terimobilisasi pada permukaan QCM. Hal tersebut dapat diamati dengan mudah apabila data hasil pengukuran ditampilkan secara keseluruhan selama proses pengukuran dalam bentuk grafik hubungan frekuensi QCM terukur dan waktu. Oleh karena itu, dibutuhkan perangkat yang menampilkan hasil pengukuran tersebut secara real-time baik dalam bentuk data realtime maupun grafik.

Secara umum pengukuran menggunakan sensor QCM minimal terdiri dari osilator, Pencacah digital, power supply, komputer dan monitor [4]. Pencacah digital dapat dibangun dari rangkaian sequensial, mikrokontroler [5], CPLD [6], [7], ataupun FPGA [8][9]. Penggunaan CPLD sebagai pencacah frekuensi yang dihubungkan ke komputer untuk menampilkan data dan menyimpan data dilakukan menggunakan komunikasi serial UART [9] atau USB HID [6]–[8]. Hasil pengukuran akan ditampilkan baik dalam bentuk tabel maupun grafik di dalam sebuah Graphic User Interface (GUI) yang didesain dengan software seperti matlab [10] ataupun labview [11].

Penggunaan LCD 16x2 atau dot matrix sebagai perangkat *display* portabel untuk menampilkan hasil pengukuran sudah banyak digunakan dalam sistem instrumentasi dan pengukuran seperti yang sudah dipublikasikan dalam beberapa tulisan, contohnya untuk menampilkan hasil pembacaan arus AC [12] dan menampilkan hasil pembacaan kandungan gas karbon monoksida (CO) [13]. Begitupula pada sistem instrumentasi pengukuran yang melibatkan sensor QCM [14][15]. Perangkat

¹ Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Malang, 65145, INDONESIA (telp: 0341-575833; fax: 0341-575833; e-mail: hudhalalu@gmail.com)

² Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Malang, 65145, INDONESIA (telp: 0341-575833; fax: 0341-575833; e-mail: dieks@gmail.com)

³ Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Malang, 65145, INDONESIA (telp: 0341-575833; fax: 0341-575833; e-mail: sakti@ub.ac.id)

*Corresponding author

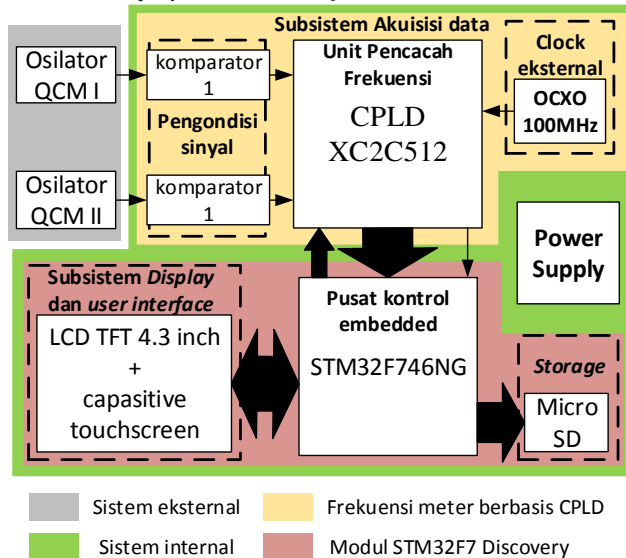


display ini hanya menunjukkan nilai frekuensi sensor QCM sesaat. Namun hal ini kurang relevan digunakan untuk menunjukkan hasil pengukuran frekuensi sensor QCM, khususnya ketika digunakan sebagai biosensor yang membutuhkan hasil pengukuran dalam bentuk grafik untuk memudahkan proses analisis.

Pengembangan sistem instrumentasi dan pengukuran saat ini cenderung mengarah pada sebuah sistem yang bersifat embedded, terintegrasi, dan portabel. Hal ini untuk menciptakan suatu sistem instrumentasi yang praktis dan efisien baik dari segi penggunaan maupun sumber daya yang digunakan. Sedangkan Penggunaan komputer sebagai perangkat pendukung dalam suatu sistem instrumentasi pengukuran dirasa kurang praktis dan efisien mengingat dimensi dan daya yang digunakan cukup besar. Oleh karena itu,

II. DASAR PERANCANGAN SISTEM

Berdasarkan beberapa permasalahan yang telah disebutkan, maka ditawarkan sebuah solusi dengan membangun sebuah sistem embedded untuk menghasilkan instrumentasi pengukuran berbasis sensor QCM yang bersifat portabel. Portabel di sini memiliki makna bahwa sistem tersebut bersifat praktis dan efisien baik dari segi dimensi, mobilitas, maupun daya yang digunakan. Selain itu, sistem embedded ini mampu mengintegrasikan seluruh subsistem pengukuran frekuensi sensor QCM dalam suatu sistem terpadu dan kompak. Oleh karena itu, desain sistem embedded untuk pengukuran frekuensi sensor QCM secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 1. Desain sistem tersebut terdiri dari subsistem akuisisi data, pusat kontrol embedded, subsistem penyimpanan data (storage), unit power supply, subsistem display, dan user interface.



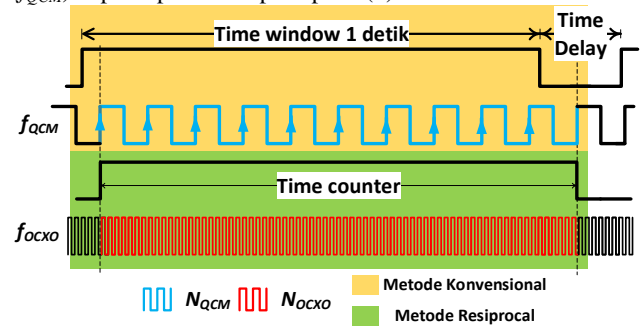
Gambar 1 Block diagram rancangan sistem embedded untuk pengukuran frekuensi QCM

Subsistem akuisisi data berfungsi untuk mencacah sinyal input dari dua sensor QCM secara real time dan simultan guna mendapatkan frekuensi dari masing-masing sinyal tersebut.

Oleh karena itu, subsistem akuisisi data tersebut minimal terdiri dari dua pengondisi sinyal, unit pencacah frekuensi, dan sumber clock eksternal. Rangkaian komparator yang berperan sebagai pengondisi sinyal berfungsi untuk memfilter noise dan mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital dengan level tegangan yang bisa dibaca oleh unit pencacah frekuensi. Komponen yang menyusun rangkaian komparator ini harus memiliki frekuensi kerja cukup besar sehingga mampu dilewati oleh sinyal dari sensor QCM yang memiliki frekuensi maksimum 10MHz. Oleh karena itu, komponen utama yang digunakan sebagai pengondisi sinyal ini adalah MAX912 seperti yang digunakan oleh wijayanto [7].

A. Pencacah Frekuensi

Pencacah frekuensi yang dikembangkan pada penelitian ini merupakan pengembangan dari pencacah frekuensi metode hybrid. Metode ini menggabungkan antara metode konvensional yang berbasis frekuensi dan reciprocal yang berbasis periode untuk mencacah sinyal input dan sinyal referensi selama rentang waktu tertentu yang dikendalikan oleh sinyal time-gate satu detik [9], [16]. Skema sinyal yang menunjukkan bagaimana metode ini bekerja ditunjukkan pada Gambar 2. Pada gambar tersebut ditunjukkan bagaimana sinyal dari sensor QCM (f_{QCM}) dicacah selama rentang time window satu detik berdasarkan metode konvensional. Sedangkan sinyal clock eksternal (f_{OCXO}) sebagai clock referensi dicacah selama rentang time counter berdasarkan metode reciprocal. Time counter sendiri merupakan rentang waktu yang dibentuk oleh siklus penuh dari f_{QCM} mulai dari rising edge pertama ketika memasuki time window hingga rising edge pertama ketika memasuki time delay. Hal tersebut menyebabkan sinyal f_{QCM} dan f_{OCXO} dicacah dengan rentang waktu yang sama. Sehingga besarnya frekuensi sensor QCM (f_{QCM}) dapat diperoleh seperti pada (3).



Gambar 2 metode hybrid untuk sistem pengukuran frekuensi sensor QCM

$$t_{QCM} = t_{OCXO} \tag{1}$$

$$\frac{N_{QCM}}{f_{QCM}} = \frac{N_{OCXO}}{f_{OCXO}} \tag{2}$$

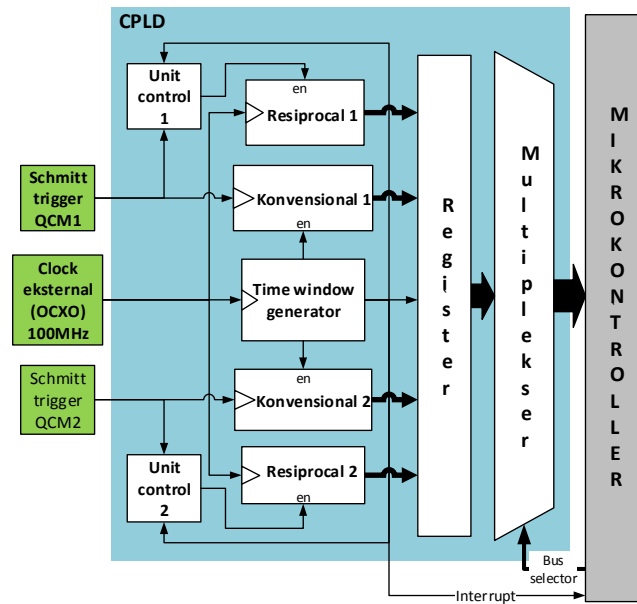
$$f_{QCM} = \frac{N_{QCM}}{N_{OCXO}} f_{OCXO} \tag{3}$$

Error pengukuran frekuensi sinyal yang dihasilkan oleh metode ini ditentukan oleh frekuensi clock eksternal. Oleh karena itu, sinyal clock yang digunakan harus memiliki frekuensi yang jauh lebih besar daripada frekuensi sinyal yang akan diukur. Selain itu, sumber clock tersebut harus memiliki faktor kestabilan yang tinggi. Tidak hanya itu, agar bisa

digunakan sebagai bagian dari sistem portabel maka sumber clock tersebut harus memiliki dimensi yang cukup kecil dengan kebutuhan daya yang rendah. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka sumber clock berupa kristal OCXO (*Oven Controlled Crystal oscillator*) merupakan pilihan yang tepat. Salah satu yang ada di pasaran adalah kristal OCXO AOCJY 100MHz dari Abracon yang memiliki frekuensi fundamental 100MHz dengan faktor kestabilan 50ppb, dimensi kecil dengan ukuran 20.8x13.2x8.2 mm, dan tegangan operasi 3.3Volt.

Berdasarkan metode pencacah frekuensi yang ditunjukkan pada Gambar 2 maka dibutuhkan beberapa bagian untuk membangun unit pencacah frekuensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Bagian tersebut diantaranya adalah time window generator untuk membangkitkan sinyal time window satu detik, pencacah digital konvensional untuk mencacah sinyal input sensor QCM, dan pencacah digital reciprocal untuk mencacah clock eksternal. Selain itu, terdapat juga unit control yang digunakan untuk membangkitkan sinyal time counter. Unit control ini dibangun dengan rangkaian sequential D-Flip-flop dengan sumber clock (clk) dari sinyal input sensor QCM dan input data (D) dari sinyal time window. Selain itu, terdapat bagian register yang digunakan sebagai penyimpan data cacahan sementara sebelum dikirimkan ke mikrokontroler melalui fungsi multiplexer. Gambar 3 menunjukkan bahwa bagian-bagian tersebut dibangun di dalam IC CPLD.

CPLD (*Complex Programmable Logic Device*) merupakan salah satu IC PLD (*Programmable Logic Device*) yang didalamnya mengandung sejumlah komponen digital yang dapat dikonfigurasi secara terprogram, salah satunya menggunakan bahasa VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*). Hal tersebut menyebabkan CPLD dapat dikonfigurasi atau dimodifikasi menjadi berbagai rangkaian digital tanpa harus mengubah *hardware* secara signifikan. Selain itu, CPLD dapat bekerja pada frekuensi tinggi dengan tegangan operasi yang cukup rendah. Hal tersebut menyebabkan CPLD cocok digunakan sebagai unit pencacah digital sebagai bagian utama dari frekuensi meter portabel yang dibangun. Salah satu IC CPLD yang memiliki kemampuan yang cukup baik untuk membangun unit pencacah frekuensi tersebut adalah XC2C512 dengan 512 *macrocell* yang didesain untuk aplikasi dengan performa tinggi dan daya rendah.



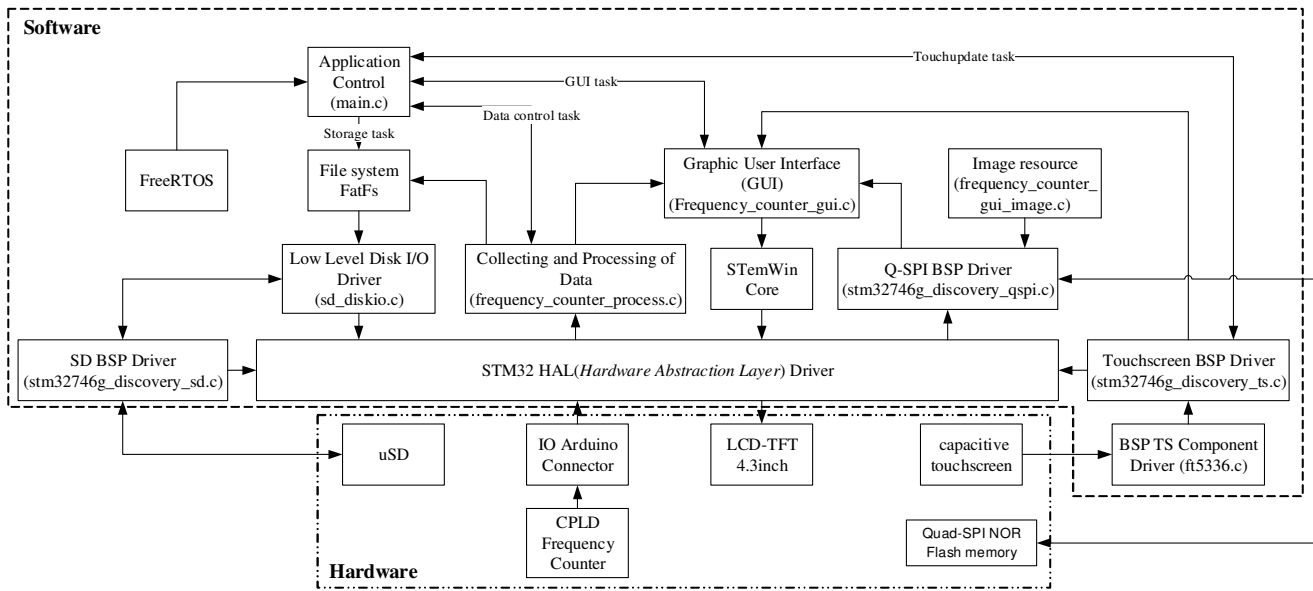
Gambar 3 Desain sistem pencacah frekuensi *hybrid* yang diimplementasikan pada CPLD

B. Mikrokontroler

Processor utama yang digunakan untuk membangun sistem embedded pada penelitian ini adalah STM32F746NG yang merupakan mikrokontroler 32-bit berbasis ARM Cortex M7. Mikrokontroler ini memiliki frekuensi kerja hingga 216 MHz, memori flash sebesar 1MB dan SRAM sebesar 320KB. Selain itu, mikrokontroler ini didukung dengan beberapa fitur yang mendukung pengembangan sistem embedded.

Dengan tujuan memudahkan pengembangan, maka sistem embedded pada penelitian ini menggunakan modul STM32F7 Discovery yang berbasis mikrokontroler STM32F746NG. Modul ini sudah dilengkapi dengan LCD TFT Color 4.3inch 480x272 pixel dengan *capacitive touchscreen*, *slot microSD*, dan port input-output, sehingga cocok digunakan dalam pengembangan sistem embedded untuk pengukuran frekuensi sensor QCM portabel. Selain itu, terdapat fitur-fitur lainnya yang dapat mendukung pengembangan perangkat ini untuk penelitian selanjutnya. Setiap fitur hardware tersebut terintegrasi dengan mikrokontroler STM32F746NGH6 seperti pada Gambar 5





Gambar 4 Desain software embedded yang terprogram di dalam mikrokontroler STM32F746NG

Arduino Shield Connector	GPIOs	CPU Processor	OTG FS	Micro USB Connector
Micro SD Card Connector	SDMMC1	ARM Cortex M7	OTG HS	HS PHY and Micro USB Connector
Quad-SPI Flash Memory	Quad-SPI	216 MHz	GPIO	Push Button and Wakeup
SDRAM	FMC	STM32F746NG	SPDIFRX	SPDIF Decoder and RCA Input Connector
4.3 inch WQVGA LCD TFT	LCD		DCMI	Camera Connector
Capacitive touchscreen	I2C		RMII	Ethernet PHY and RJ45 Connector
I2C Extension Connector			RTC	32 kHz Crystal
Audio DAC and Amplifier	SAI	SWD		
MEMS Microphone		ST-LINK/V2-1		

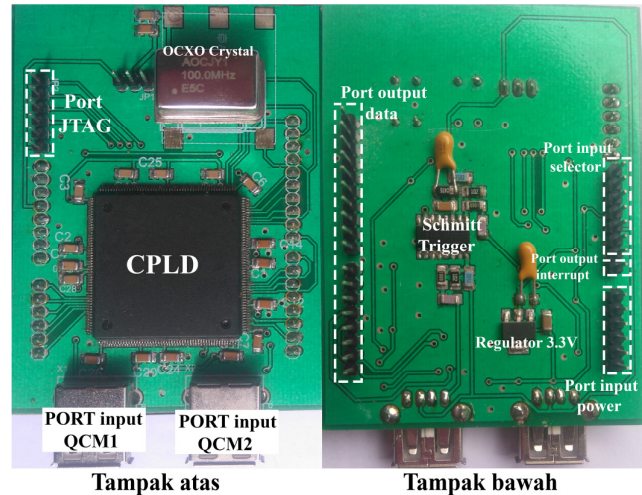
Gambar 5 Diagram block hardware dari STM32F7 Discovery

Fitur-fitur pada modul STM32F7 Discovery yang mendukung pengembangan sistem portabel pencacah frekuensi sensor QCM diantaranya adalah Arduino Shield Connector, Micro SD Card Connector, Quad-SPI Flash Memory, SDRAM, LCD TFT 4.3 inch, capacitive touchscreen, dan ST-LINK/V2-1 yang terhubung dengan mikrokontroler STM32F746NG melalui beberapa *peripheral* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Arduino Shield Connector berfungsi menghubungkan STM32F746NG dengan CPLD XC2C512, micro SD Card Connector berfungsi menghubungkan microSD dengan STM32F746NG agar dapat berfungsi sebagai perangkat penyimpan data hasil pengukuran, Quad-SPI Flash Memory berfungsi menyimpan gambar dan

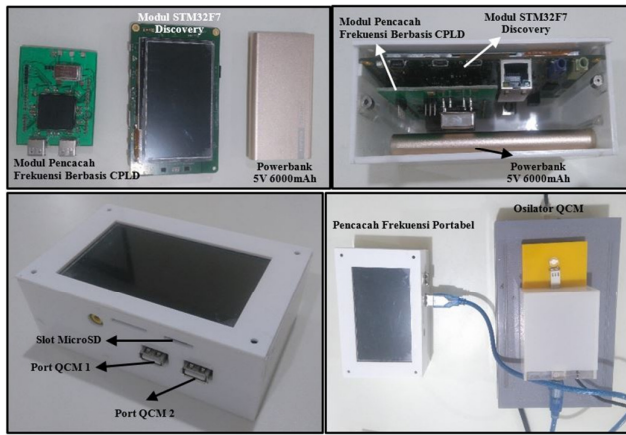
icon yang digunakan dalam mengembangkan Graphical User Interface yang ditampilkan pada LCD TFT. Sedangkan LCD TFT berfungsi untuk menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk grafik hubungan waktu dan frekuensi hasil pengukuran secara real-time.

III. RANCANGAN, HASIL, DAN PEMBAHASAN

A. Hardware Sistem Embedded Pencacah Frekuensi Portabel



Gambar 6 Rangkaian pencacah frekuensi portabel berbasis CPLD



Gambar 7 Hasil Implementasi desain sistem embedded berbasis ARM Cortex M7 STM32F746NG untuk pengukuran frekuensi sensor QCM portabel

B. Software Sistem Embedded Pencacah Frekuensi Portabel

--generator TimeWindow satu detik

```
Process(clock)
begin
  if clock'event and clock='1' then
    counter <= counter + 1;
    if counter = "000000000000000000001100100" then
      TimeWindow <= '1';
    elsif counter = "10111101011110000100001010" then
      TimeWindow <= '0';
      counter <= "000000000000000000000000000000";
    end if;
  end if;
end Process;
interrupt <= TimeWindow;
```

--cacahan sinyal input selama TimeWindow

```
Process(QCM,TimeWindow,nQCM1)
begin
  if TimeWindow='0' then
    nQCM <= "000000000000000000000000000000";
  else
    if rising_edge(QCM) then
      nQCM <= nQCM + 1;
    end if;
  end if;
end Process;
```

--D flip-flop untuk membangkitkan sinyal TimeCounter

```
Process(TimeWindow,QCM,counter)
begin
  if QCM'event and QCM='1' then
    counter <= TimeWindow;
  end if;
end Process;
```

TimeCounter <= counter;

--cacahan sinyal clock selama TimeCounter

```
Process(TimeCounter,clock,nOCXO)
begin
  if TimeCounter='0' then
```

```
nOCXO <= "000000000000000000000000000000";
else
  if rising_edge(clock) then
    nOCXO <= nOCXO + 1;
  end if;
end if;
end Process;
```

Gambar 8 Listing program pencacah frekuensi yang didesain dengan bahasa pemrograman VHDL

C. Pengujian Pencacah Frekuensi Berbasis CPLD

Gambar 9

D. Pengujian Graphics User Interface dan Penyimpanan Data Pada MicroSD

Gambar 10 Hasil pengukuran frekuensi sensor QCM yang ditampilkan pada layar LCD TFT Color 4.3 inch

Gambar 11 Hasil pengukuran frekuensi sensor QCM yang tersimpan pada micro SD

IV. KESIMPULAN

Sistem embedded untuk pengukuran frekuensi sensor QCM yang bersifat portabel bisa dibangun dengan berbasiskan mikrokontroler 32-bit ARM Cortex M7 (STM32F7 Discovery) sebagai sistem kontrol utama. Sistem embedded ini akan mengintegrasikan pencacah frekuensi berbasis CPLD, LCD TFT Color 4.3 inch dengan *capacitive touchscreen*, dan sistem penyimpan data universal berupa microSD. Hasil implementasi dari desain sistem embedded ini berupa perangkat pencacah frekuensi portabel yang bersifat praktis dan *mobile*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap bagian yang menyusun sistem embedded ini sudah bekerja dengan baik, terutama sebagai perangkat yang mengukur frekuensi sensor QCM.

SARAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa perangkat pencacah frekuensi portabel yang dikembangkan dalam penelitian ini masih terdapat banyak kelemahan. Oleh karena itu, terdapat beberapa hal yang perlu diperbaiki dan dikembangkan pada penelitian selanjutnya, diantaranya adalah:

- Mengembangkan *Graphic User Interface* (GUI) yang lebih baik, seperti menambahkan fungsi *gesture* untuk memperbesar dan memperkecil grafik, menambahkan *virtual layer* agar dapat menampilkan grafik lebih fokus, menambahkan fungsi folder agar bisa mengelola file hasil pengukuran, dan membuat fungsi untuk menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk tabel.
- Mengintegrasikan osilator kristal kuarsa ke dalam sistem yang dibangun agar perangkat pengukuran menjadi lebih praktis.

REFERENSI

- [1] W. M. Albers, "Immobilisation of Biomolecules onto Organised Molecular Assemblies," Cranfield university, 1999.
- [2] B. D. Vogt, E. K. Lin, W. Wu, and C. C. White, "Effect of Film Thickness on the Validity of the Sauerbrey Equation for Hydrated Polyelectrolyte Films," *Phys. Chem. B*, vol. 108, pp. 12685-12690,



- 2004.
- [3] H. Jie, "Technical Background , Applications and Implementation of Quartz Crystal Microbalance Systems," University of Jyvaskyla, 2006.
- [4] B. Chang and T. Zhao, "QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE STUDY OF DNA IMMOBILIZATION AND HYBRIDIZATION FOR DNA," Michigan State University, 2008.
- [5] M. A. Syahbana, "Pemanfaatan PIC18F4550 Sebagai Antarmuka Komunikasi USB untuk Pencacah Frekuensi," *Phys. STUDENT J.*, 2014.
- [6] S. P. Sakti, "Dual Channel High Precision 26 Bit Frequency Counter Using CPLD XC95108XL for QCM Sensor System," *Int. J. Inf. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 239–243, 2014.
- [7] V. R. Wijayanto and S. P. Sakti, "Design of Dual Edge 0 . 5 Hz Precision Frequency Counter for QCM Sensor," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 771, pp. 29–32, 2015.
- [8] M. A. Syahbana, D. J. H. D. Santjojo, and S. P. Sakti, "High-Resolution Multiple Channel Frequency Counter Using Spartan-3E FPGA," pp. 111–114, 2016.
- [9] M. D. Valdés, I. Villares, J. Fariña, and M. J. Moure, "A FPGA-based frequency measurement system for high-accuracy QCM sensors," *Proc. - 34th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. IECON 2008*, pp. 1707–1712, 2008.
- [10] N. Zealand *et al.*, "Quartz Crystal Microbalance for Medical Diagnostics," in *International Conference on Sensing Technology*, 2005, pp. 500–504.
- [11] K. J. Heng, "QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON LIQUID Submitted by Khu Jia Heng Department of Mechanical Engineering In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Bachelor of Engineering National University of Singapore," 2004.
- [12] S. P. Sakti, "Rancang Bangun Sistem Pembatas Arus Daya Kecil Tegangan 220VAC Berbasis Mikrokontroler," *Tekno. Elektro*, vol. 15, no. 1, pp. 103–110, 2016.
- [13] S. K. Sarungallo, I. G. Putu, R. Agung, and L. Jasa, "Rancang Bangun Alat Ukur Uji Emisi Gas Karbon Monoksida (CO) Berbasis Mikrokontroler," *Tekno. Elektro*, vol. 16, no. 22, pp. 141–145, 2017.
- [14] S. Chunta, C. Promptmas, and C. Cherdchu, "Lipoprotein Sensor : A Piezoelectric Quartz Crystal Device," *Appl. Biomed. Eng.*, vol. 2, pp. 24–32, 2009.
- [15] P. Sangeetha and V. Juliet, "Readout Method for Pathogen Detection using Biosensor," *IEEE J. Quantum Electron.*, no. 978, 2014.
- [16] M. A. B. Kaid, "FPGA Based Frequency Measurement for The Purpose of Synchronization," University of Kassel, Kassel, 2010.