

Metode Pencacahan Frekuensi *Reciprocal* untuk Sensor Gas Resonator Kuarsa yang Diimplementasikan pada *Field Programmable Gate Array*

Reza Barkah Harjunadi, Muhammad Rivai, Rudy Dikairono
Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
e-mail: muhammad_rivai@ee.its.ac.id

Abstrak— Pencacahan frekuensi yang sering digunakan oleh kebanyakan orang di era ini bermetode konvensional, dimana metode itu melakukan pencacahan dengan periode satu detik. Saat ini telah berkembang metode pencacahan frekuensi dengan periode yang dapat ditentukan yang disebut dengan metode *reciprocal*. Salah satu sensor gas yang dapat digunakan untuk mengaplikasikan metode ini adalah *Quartz Crystal Microbalance* (QCM). QCM merupakan salah satu sensor gas resonator kuarsa yang dapat digunakan untuk mengukur suatu massa yang sangat kecil dengan luaran berupa frekuensi. Beberapa aplikasi QCM digunakan pada sistem identifikasi gas. Pada penelitian ini telah dirancang sistem pencacah frekuensi metode *reciprocal*. Sistem ini berbasis komponen digital yang tersusun atas rangkaian *frequency difference*, pembagi frekuensi, dan pencacah. Sistem digital direalisasikan menggunakan *Field Programmable Gate Array* (FPGA). Data dari pencacahan dikirim ke komputer untuk proses identifikasi menggunakan *neural network*. Pada pengujian identifikasi gas menunjukkan bahwa sistem ini dapat mengenali gas uji sebesar 80%.

Kata Kunci— FPGA, Pencacahan frekuensi *reciprocal*, QCM.

I. PENDAHULUAN

Proses pencacahan frekuensi pada umumnya memerlukan waktu selama satu detik. Pada tahun 80-an ditemukan sebuah metode yang dapat mencacah frekuensi selama periode yang diinginkan. Metode ini disebut dengan *reciprocal frequency counter*.

Salah satu sensor gas yang dapat digunakan untuk mengukur suatu massa yang sangat kecil dengan data luaran berupa frekuensi adalah *Quartz Crystal Microbalance* (QCM). QCM memiliki kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan sensor gas lainnya. Sensor ini mempunyai sensitivitas yang tinggi dan stabil dalam suhu yang tinggi. QCM digunakan untuk menerima gas yang ditiupkan dan akan menghasilkan perubahan frekuensi yang berbeda untuk tiap gas yang berbeda.

Pada penelitian ini sistem digital direalisasikan menggunakan FPGA, yang mana memiliki banyak keunggulan dibanding mikrokontroler. Di dalam FPGA dapat digunakan

untuk implementasi rangkaian logika yang sangat kompleks pada chip tunggal tanpa harus mendesain rangkaian secara kasar yang menghabiskan banyak waktu. Apabila terdapat kesalahan proses desain pada FPGA dapat diulang secara cepat tanpa harus mengubah perangkat kerasnya. Terlebih lagi bila ingin menambah jumlah sensor yang akan digunakan, maka hanya perlu memodifikasi program pada FPGA. Hasil pencacahan frekuensi akan diproses dengan menggunakan *software* yang menggunakan algoritma *artificial neural network* pada komputer untuk mengenali jenis gas yang dialirkan pada sensor.

II. DASAR TEORI

A. *Reciprocal Frequency Counter*

Frequency counter adalah pencacahan banyaknya siklus frekuensi per lama waktu yang digunakan dalam mencacah, dimana hal ini seperti ditunjukkan pada persamaan (1).

$$\text{frekuensi (Hz)} = \frac{\text{banyak siklus}}{\text{waktu pengukuran}} \quad (1)$$

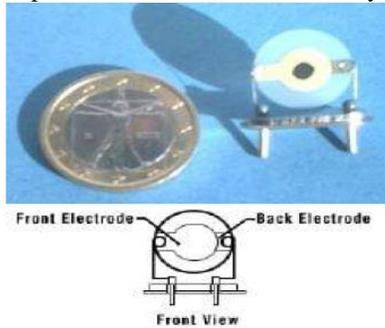
Metode *Reciprocal* membutuhkan dua register pencacah, register pertama untuk mencacah banyaknya siklus input, dan yang kedua untuk mencacah banyaknya pulsa *clock*, untuk mengukur durasi waktu. Berbeda dengan metode konvensional, pada metode ini waktu pengukuran didapatkan melalui besar periode yang dibutuhkan untuk satu siklus *clock*. Sedangkan pada metode konvensional, waktu pengukuran sudah ditentukan yaitu selama satu detik [1].

B. *Resonator Kuarsa*

Pada tahun 1959, Sauerbrey memperkenalkan resonator kuarsa pertama kali. Dia menunjukkan penemuan tentang karakteristik kristal kuarsa. Kristal ini memiliki sifat yang dapat menghasilkan tegangan listrik ketika diberi tegangan mekanikal dan juga sebaliknya berubah bentuk mekanikalnya ketika diberi tegangan listrik. Sifat ini disebut dengan sifat *piezoelectric* [2].

Dengan adanya sifat *piezoelectric* maka resonator kuarsa dapat digunakan sebagai sensor kimiawi. Resonator kuarsa yang memiliki membran yang sensitif terhadap gas dapat digunakan untuk pendeteksian gas. Molekul gas yang ditiupkan dan menempel pada membran yang sensitif ini akan

menyebabkan perubahan pada massa membran yang akan mengakibatkan perubahan frekuensi resonansinya.



Gambar 1. Sensor QCM [3]

Namun ketika melokul gas ini telah lepas dari membran, frekuensi resonator ini akan kembali pada frekuensi awalnya. Hal ini biasa disebut dengan nama *mass loading effect* [3]. Perubahan frekuensi yang terjadi pada resonator kuarsa ini dirumuskan oleh Sauerbrey pada persamaan (2).

$$\Delta f = -\left(\frac{2f^2}{\rho v A}\right)\Delta m \quad (2)$$

Keterangan:

Δf adalah perubahan frekuensi yang diamati (Hz).

f adalah frekuensi resonansi dasar (Hz).

Δm adalah perubahan massa per unit area (kg).

ρ adalah kerapatan kristal (kg/m^3).

v adalah kecepatan propagasi akustik pada kristal (m/s).

A adalah luas elektroda (m^2).

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan kuarsa resonator yang telah ditentukan, besar dari kerapatan kristal (ρ), kecepatan propagasi akustik kristal (v), dan luas elektroda (A) tidak akan berubah. Semakin besar perubahan massa (Δm) akibat menempelnya molekul gas, akan mengakibatkan perubahan frekuensi (Δf) semakin rendah. Semakin besar nilai frekuensi resonansi dasar (f) maka perubahan frekuensinya (Δf) akan semakin besar [4].

QCM adalah salah satu resonator kuarsa yang memiliki membran yang sensitif yang dapat digunakan sebagai sensor elektronik serta mempunyai fungsi seperti indera penciuman. Pengembangan QCM yang digunakan untuk gas membuka dunia baru dalam hal aplikasi, termasuk elektrokimia. Wujud sensor QCM dapat dilihat pada gambar 1 [5].

Frekuensi resonansi dasar pada QCM ditentukan oleh potongan dan dimensi keping kristal yang digunakan pada saat pembuatan. Struktur dari sensor QCM adalah kristal yang terdapat lapisan SiO_2 dan diapit oleh dua elektrode sehingga dapat menghasilkan potensial listrik sebagai respon terhadap tekanan mekanik yang diberikan [6].

C. Field Programmable Gate Array

Field Programmable Gate Array (FPGA) merupakan sebuah IC yang terdiri dari blok-blok logika yang interkoneksi dapat diprogram. Struktur elektrikal konfigurasi yang terinterkoneksi memperbolehkan aplikasi rangkaian yang

kompleks untuk dibuat pada beberapa sel yang tersedia dalam FPGA [7].



Gambar 2. Board FPGA Spartan 3E

Secara umum FPGA terdiri dari *logic block* dan blok input/ouput. Semua blok didalamnya dapat diprogram sampai pada skala tertentu. Untuk generasi FPGA terbaru memiliki kemampuan yang tinggi dalam proses logika dengan konfigurasi mencapai 550MHz, dibandingkan dengan mikrokontroler yang hanya mampu sampai 24 Mhz [8].

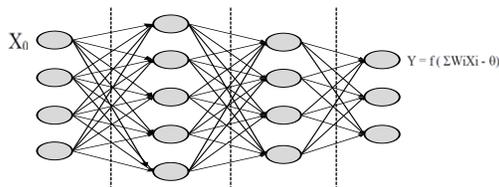
Modul FPGA yang digunakan pada penelitian ini adalah Spartan-3E dengan chip XC3S250E-4TQ144, memiliki sistem gerbang 250 ribu, 612 total CLB dan 2.448 *slice*. Untuk *supply* dari FPGA ini sendiri hanya menggunakan *supply* dari port USB. Dibanding FPGA pendahulunya, modul ini lebih berukuran minimalis.

D. Artificial Neural Network

Artificial Neural Network (ANN) adalah salah satu representasi buatan dari otak manusia yang selalu mencoba untuk mensimulasikan proses pembelajaran pada otak manusia tersebut. Istilah buatan digunakan karena *neural network* atau lebih dikenal dengan jaringan syaraf ini diimplementasikan dengan menggunakan program komputer yang mampu menyelesaikan sejumlah proses perhitungan selama proses pembelajaran [9].

Topologi *neural network* yang digunakan terdiri dari empat layer yaitu layer input, dua hidden layer, dan satu layer output, seperti ditunjukkan pada gambar 3. Untuk mendapatkan output dari setiap node layer output adalah dengan mengurangi total dari setiap *weight* yang dikalikan dengan setiap node input dengan *threshold* pada node layer output [10].

Pada penelitian ini, metode ANN digunakan untuk proses *training* dan *learning* dalam pengidentifikasian gas. Pada tahapan *training* akan dilakukan dengan menggunakan metode *backpropagation neural network*, dimana metode ini berfungsi untuk mendapatkan nilai *weight* dan *threshold* yang akan digunakan untuk proses identifikasi gas.



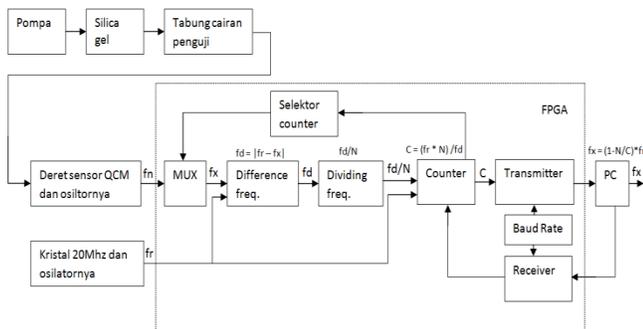
Gambar 3. Topologi *Neural network*

III. PERANCANGAN SISTEM

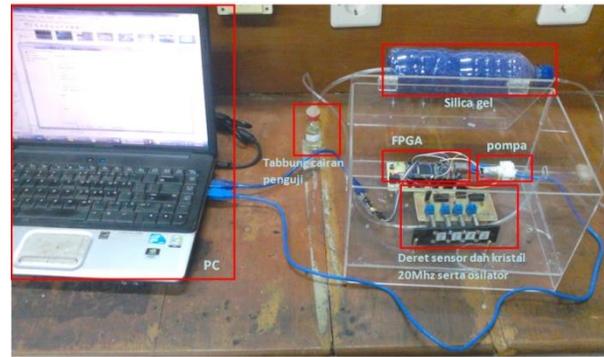
Pada perancangan dan pembuatan alat meliputi perancangan *hardware* dan perancangan *software*. Blok diagram keseluruhan sistem ditunjukkan pada gambar 4. Perancangan *hardware* dari sistem ini terdiri dari, perancangan pompa udara dan silica gel untuk mendapatkan udara bersih sebelum masuk ke tabung cairan pengujian. Tabung cairan pengujian akan memberikan gas kepada deret sensor QCM. Sensor ini dirancang berderet agar dalam pengenalan gas didapatkan hasil yang berbeda tiap sensornya. Sensor yang digunakan dalam penelitian ini adalah PEG-1540, OV-275, Cellulose, Ap-L. Foto keseluruhan alat ditunjukkan pada gambar 5.

Perancangan *software* dilakukan didalam FPGA menggunakan bahasa VHDL untuk merancang setiap blok yang diimplementasikan pada FPGA. Setiap blok yang dirancang dalam FPGA terdiri dari *multiplexer*, DFF (sebagai rangkaian *difference frequency*), rangkaian pembagi frekuensi (sebagai rangkaian *dividing frequency*), pencacah frekuensi, dan *interfacing serial* sebagai transmitter dan receivernya.

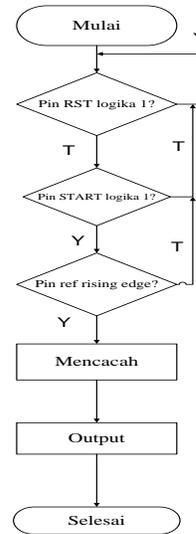
Blok receiver akan memberikan sinyal kepada blok *counter* untuk memulai pencacahan ketika blok *counter* mendapatkan sinyal dari komputer. Ketika blok *counter* selesai mencacah, blok ini akan memberikan sinyal kepada MUX untuk beralih ke sensor selanjutnya serta memberikan output dari cacahan ke transmitter untuk diproses pada komputer. Diagram alir dari blok *counter* ini ditunjukkan pada gambar 6. Pada komputer dilakukan perhitungan untuk mendapatkan frekuensi sensor serta untuk pengidentifikasian gas menggunakan metode *neural network*.



Gambar 4. Blok diagram sistem



Gambar 5. Foto Keseluruhan alat



Gambar 6. Diagram alir blok *counter*

IV. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pada pengujian rangkaian *frequency difference*, pengujian dilakukan dengan memberikan satu frekuensi tetap dan satu frekuensi yang diubah-ubah. Hasil dari pengujian ditunjukkan pada tabel 1. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan rangkaian *frequency difference* yang diimplementasikan pada FPGA berfungsi dengan baik untuk frekuensi antara 11 Mhz hingga 20 Mhz dengan rerata kesalahan 0,02%.

Pada pengujian rangkaian pembagi frekuensi, pengujian dilakukan dengan cara memberikan nilai pembagi yang diubah-ubah. Hasil dari pengujian ini ditunjukkan pada tabel 2. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan rangkaian pembagi frekuensi yang diimplementasikan pada FPGA berfungsi dengan baik dengan rerata kesalahan 1,88%. Sesuai dengan metode *reciprocal*, dimana semakin besar periodenya maka pencacahan semakin besar.

Tabel 1. Pengujian rangkaian *difference frequency*

D(Mhz)	CLK(Mhz)	Out(Mhz)	error
20	19	0,99997	0,003%
20	18	1,996	0,050%
20	17	2,999	0,033%
20	16	3,99	0,025%
20	15	4,999	0,020%
20	14	5,999	0,017%
20	13	6,999	0,014%
20	12	7,999	0,013%
20	11	8,999	0,011%
20	10	9,5	5,000%
20	9	8,999	18,191%
20	8	7,999	33,342%
20	7	6,999	46,162%
20	6	5,999	57,150%
20	5	4,999	66,673%
20	4	3,999	75,006%

Pada pengujian rangkaian pencacah dilakukan dengan menggunakan dua sinyal frekuensi yang berbeda. Sinyal pertama sebagai frekuensinya dan sinyal kedua sebagai periode pencacahan. Hasil dari pengujian ditunjukkan pada tabel 3. Dari hasil pengujian pencacahan, dapat disimpulkan bahwa pencacahan berfungsi dengan baik untuk frekuensi yang tidak kurang dari setengah frekuensi yang digunakan sebagai periodenya.

Pengujian *neural network* dilakukan dengan memberikan deret sensor beberapa masukan sampel gas. Gas yang digunakan dalam pengujian sensor adalah minyak kayu putih, amoniak, dan thinner. Pada saat proses *training*, *error* yang diinginkan adalah dibawah 0,0001. Nilai batas *error* pada proses *neural network* dapat dilihat pada tabel 4. Apabila nilai *error* telah mencapai yang diinginkan, nilai *weight* dan *threshold* yang akan digunakan untuk pengenalan gas akan didapatkan. Hasil pengujian *neural network* pada gas uji ditunjukkan pada tabel 5. Dari 30 pengujian terdapat 6 kesalahan identifikasi gas.

Tabel 2. Pengujian rangkaian pembagi frekuensi

input (kHz)	dividing by	output (Hz)	output seharusnya (Hz)	error (%)
9,9538	32	310	31,05625	0,34%
9,9538	64	153	155,528125	1,63%
9,9538	128	78	77,7640625	0,30%
9,9538	256	38	38,88203125	2,27%
9,9538	512	20	19,44101563	2,88%
9,9538	1024	10	9,720507813	2,88%
9,9538	2048	5	4,860253906	2,88%

Tabel 3. Pengujian rangkaian pencacah

Sinyal 1 (sebagai frekuensi (Mhz))	Sinyal 2 (sebagai periode pencacahan (µs))	Hasil pencacahan	error (%)
20	10 ⁻⁶	20	0,00%
20	0,5*10 ⁻⁶	10	0,00%
20	0,33*10 ⁻⁶	6	0,00%
20	0,25*10 ⁻⁶	5	0,00%
20	0,2*10 ⁻⁶	4	0,00%
20	0,166*10 ⁻⁶	3	0,00%
20	0,143*10 ⁻⁶	2	0,00%
20	0,125*10 ⁻⁶	2	0,00%
20	0,11*10 ⁻⁶	2	0,00%
20	10 ⁻⁵	1	50,00%

Tabel 4. Nilai *error* pada proses *training neural network*

	amoniak	thinner	m.kayu putih
error	3,995182*10 ⁻⁵	9,997505*10 ⁻⁵	7,09260*10 ⁻⁵

Tabel 5. Pengujian *neural network* pada gas uji

uji ke-	gas yang di uji	Hasil pembacaan
1	Amoniak	Amoniak
2	Amoniak	Amoniak
3	Amoniak	Amoniak
4	Amoniak	Amoniak
5	Amoniak	Amoniak
6	Amoniak	Amoniak
7	Amoniak	Amoniak
8	Amoniak	Amoniak
9	Amoniak	Amoniak
10	Amoniak	Amoniak
11	Thinner	Thinner
12	Thinner	Amoniak
13	Thinner	M. Kayu Putih
14	Thinner	Thinner
15	Thinner	M. Kayu Putih
16	Thinner	Amoniak
17	Thinner	Amoniak
18	Thinner	Thinner
19	Thinner	Thinner
20	Thinner	Thinner
21	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
22	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
23	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
24	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
25	M. Kayu Putih	Thinner
26	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
27	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
28	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
29	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih
30	M. Kayu Putih	M. Kayu Putih

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dirancang pencacahan frekuensi dengan metode reciprocal untuk sensor gas resonator kuarsa yang diimplementasikan pada *Field Programmable Gate Array*. Pada rangkaian *frequency difference* akan berfungsi dengan baik bila digunakan pada frekuensi antara 11 Mhz hingga 20 Mhz. Pemilihan nilai pembagi pada rangkaian pembagi frekuensi sangat mempengaruhi hasil dan lama proses pencacahan, semakin besar nilai pembaginya maka resolusi pencacahan akan semakin tinggi. Pada rangkaian *counter*, sinyal frekuensi yang digunakan sebagai periode pada proses pencacahan tidak kurang dari setengah frekuensi yang dicacah. Proses identifikasi gas uji menggunakan *neural network* mampu mengidentifikasi gas uji dengan tingkat keberhasilan pada keseluruhan sistem mencapai 80%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]Johansson, Staffan, 2005, "New Frequency Counting Pinciple Improves Resolution", Marketing Manager at Pendulum Instruments AB, Bromma, Sweden.
- [2]Nakamoto, T., dan Moriizimi,T., 1998, "Odor Sensor Using Quartz Resonator Array dan Neural Network Pattern Recognition", Proceeding Ultrason.Symp.
- [3]Lairan, Aldi, 2010, "Perancangan Sistem Pengenalan Jenis Odor Menggunakan 20Mhz *Quartz Crystal Microbalance* dan FPGA", Laporan Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4]Bystrom, Emil, "Construction of a Portable Piezoelectric Quartz Crystal Sensor Array for Determination of Petroleum Compounds in Contaminated Soil", Umea Universitet, p.7.
- [5]Anonim, 2014, "QCM100-Quartz Crystal Microbalance Theory and Calibration", Standford Research Systems.
- [6]Doni Saldiro, 2009, "Mengenal Komponen Dasar Kristal", Majalah Elektronika Online.
- [7]Lindenberg, F. Mayer, 2009, "High-Level FPGA Programming through Mapping Process Network to FPGA Resources", Institute of Computer Technology, Technical University of Hamburg-Harburg.
- [8]Xilinx, 2013, "Spartan-3E FPGA Family: Introduction and Ordering Information", United States.
- [9]Kusumadewi, Sri, 2004, "Membangun Jaringan Syaraf Tiruan Menggunakan MATLAB dan EXCEL-LINK", Graha Ilmu, Yogyakarta.
- [10] Ciptadi, Aditya, 2013," Pengembangan Sistem Hidung Elektronik Menggunakan Kominukasi Serial Bluetooth Pada PC Tablet", Laporan Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.