

Optimasi Konfigurasi Inter Digital Capacitors Sensor (IDCS) menggunakan Metode Particle Swarm Optimization

Optimization of The Inter Digital Capacitors Sensor (IDCS) Configuration using The Particle Swarm Optimization Method

Ulfa Niswatul Khasanah*¹

Program Studi Fisika, Fakultas Ilmu Eksakta, Universitas Nahdlatul Ulama Blitar
e-mail: ulfaniswatul13@gmail.com

Abstrak

IDCS merupakan sensor yang menggunakan prinsip kapasitif yang diimplementasikan pada ukuran kecil dan tipis. Konfigurasi IDCS memiliki pola seperti sisir yang terlukis pada lapisan tembaga dengan tebal 1 mikrometer. Sisir elektrode tersebut meliputi lebar (a), jarak antar dua elektrode (b), panjang (L) dan jumlah (N). Berdasarkan prinsip kerjanya, sensor ini menghasilkan nilai kapasitansi yang diolah menjadi konstanta dielektrik menggunakan perhitungan. Untuk mendapatkan konfigurasi yang optimal, maka perlu dilakukan optimasi. Optimasi dilakukan menggunakan dua tahap. Tahap pertama menggunakan metode gradien untuk menentukan batas-batas optimasi. Metode gradien adalah salah satu metode yang menggunakan perhitungan untuk mencari nilai maksimum dari sebuah fungsi $y = f(x)$. Perancangan optimasi disesuaikan dengan analisis matematis perumusan permitivitas pada IDCS. Berdasarkan hasil optimasi gradien diperoleh nilai $N \neq 1$, artinya N tidak boleh bernilai 1, batasan ini sesuai dengan prinsip kapasitor plat sejajar, dimana syarat konfigurasi kapasitor yaitu terdiri dari dua plat. Untuk variabel panjang elektrode (L) diperoleh Batasan yaitu $L \neq 0$. Setelah diperoleh Batasan untuk konfigurasi IDCS, maka dilakukan tahap kedua yaitu optimasi menggunakan PSO. Parameter yang digunakan untuk optimasi yaitu jumlah partikel = 500, kecepatan maksimumnya 20, learning factor = 2, inertia weight 0,8 – 1,2 dan kondisi berhenti Ketika mencapai eror minimum. Range hasil dari optimasi PSO yaitu nilai lebar elektroda 1-3 mm, jarak antara dua elektroda 1-3mm, jumlah elektroda antara 3-7, Panjang elektroda 4-7 mm. Adapun nilai yang sering muncul dengan eror terkecil yaitu $a = 3$, $b = 3$, $N = 6$, $L = 5$.

Katakunci: IDCS, Optimization, PSO

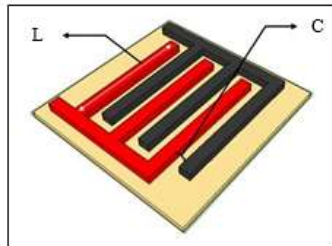
Abstrack

IDCS is a sensor that uses the capacitive principle which is implemented on a small and thin size. The IDCS configuration has a comb-like pattern painted on a 1 micrometer thick layer of copper. The electrode comb includes width (a), distance between the two electrodes (b), length (L) and number (N). Based on its working principle, this sensor produces a capacitance value which is processed into a dielectric constant using calculations. To get the optimal configuration, it is necessary to do optimization. Optimization is carried out using two stages. The first stage uses the gradient method to determine the optimization boundaries. The gradient method is a method that uses calculations to find the maximum value of a function $y = f(x)$. The optimization design is adapted to the mathematical analysis of the permittivity formulation in IDCS. Based on the gradient optimization results, the value of $N \neq 1$ is obtained, meaning that N cannot be 1. This limitation is in accordance with the principle of parallel plate capacitors, where the requirements for a capacitor configuration are to consist of two plates. For the electrode length variable (L) the Boundary is obtained, namely $L \neq 0$. After the Boundary for the IDCS configuration is obtained, the second stage is carried out, namely optimization using PSO. The parameters used for optimization are the number of particles = 500, the maximum speed is 20, the learning factor = 2, the inertia weight is 0.8 – 1.2 and the stop condition when it reaches the minimum error. The range of results from the PSO optimization is the width of the electrode 1-3 mm, the distance between the two electrodes is 1-3mm, the number of electrodes is between 3-7, the length of the electrode is 4-7 mm. The values that often appear with the smallest error are $a = 3$, $b = 3$, $N = 6$, $L = 5$.

Keyword: IDCS, Optimization, PSO

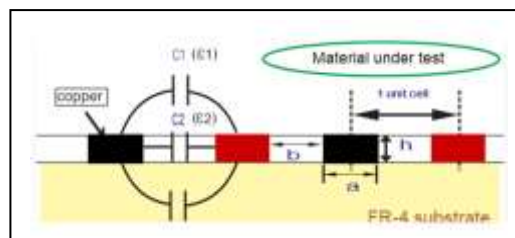
PENDAHULUAN

IDCS merupakan salah satu implementasi dari kategori *thin film sensor* yang banyak digunakan saat ini. Sensor ini memiliki kelebihan yaitu memiliki desain sederhana, ukuran yang kecil namun tetap menghasilkan nilai yang lebih akurat. Aplikasi IDCS digunakan untuk mengetahui sifat fisika, maupun sifat kimia dari bahan, dapat juga digunakan untuk mengetahui sifat kelistrikan bahan. IDCS banyak digunakan pada *chemical and biological sensors*, antara lain IDCS digunakan untuk mengetahui homogenitas campuran obat, dan pada industri makanan IDCS digunakan untuk mendeteksi merkuri pada ikan laut (4). Pada industri minyak dan gas, IDCS memiliki peran sebagai sensor untuk mengukur permitivitas crude oil. IDCS menggunakan prinsip kapasitor plat sejajar yang dilukis seperti sisir pada papan circuit PCB (Gambar 1).



Gambar 1. IDCS

Jika IDCS dipotong melintang, maka akan terlihat parameter-parameter penyusun konfigurasi IDCS. Gambar 2 menunjukkan konfigurasi IDCS yang menunjukkan prinsip kapasitor keping sejajar yang terdiri dari dua buah plat yang terhubung oleh sumber listrik AC yang mengakibatkan timbulnya dipol-dipol listrik yang menghasilkan medan listrik. Sisir elektrode warna merah dan hitam menunjukkan kutub positif dan kutub negatif yang dihasilkan oleh dipol-dipol listrik tersebut. Medan listrik yang terbentuk menghasilkan kapasitansi, perbedaan antara IDCS dengan plat kapasitor sejajar yaitu, pada kapasitor plat sejajar hanya ditinjau medan listrik yang sejajar saja, namun pada IDCS medan listrik yang ditinjau adalah medan listrik keseluruhan yaitu yang berbentuk sejajar maupun elliptic.



Gambar 2. IDCS tampak samping

Konfigurasi IDCS terdiri dari jarak antara dua elektroda yang disimbolkan dengan huruf (b), lebar elektroda yang disimbolkan dengan huruf (a), ketebalan lapisan tembaga yang disimbolkan dengan huruf (h) jumlah elektroda yang disimbolkan dengan huruf (N), Panjang elektroda yang disimbolkan dengan huruf (L)[6]. Secara matematis, kapasitansi yang terukur oleh IDCS dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$C = C_{uc} \cdot (N-1) \cdot L \quad (1)$$

C adalah kapasitansi yang terukur dan memiliki satuan Farad, sedangkan C_{uc} (Capacitance Unit Cell) merupakan kapasitansi yang dihasilkan antara dua elektroda (1 elektrode positif dan 1 elektrode negatif) yang disebut kapasitansi 1 *unit cell*. Kapasitansi pada 1 *unit cell* diperoleh dari 3 jenis kapasitor yang disusun secara parallel. Kapasitor-kapasitor tersebut dibedakan berdasarkan mediumnya. Ketiga kapasitor tersebut dapat dirumuskan menjadi persamaan (2).

$$C_{uc} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2)$$

Berdasarkan gambar 2, medium yang pertama adalah udara, medium kedua adalah material uji dan medium yang ketiga adalah medium substrat, substrat yang digunakan pada PCB adalah FR4. Kapasitor pada medium 2 menggunakan perhitungan kapasitor plat sejajar, sedangkan kapasitor pada medium 1 dan 3 menggunakan perhitungan kapasitor dengan medan listrik berbentuk elips yang ditunjukkan persamaan 3 dan 4 dibawah ini.

$$C1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 K(\sqrt{1-k^2})}{2 K(k)} \quad (3)$$

$$C3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 K(\sqrt{1-k^2})}{2 K(k)} \quad (4)$$

Umumnya IDCS digunakan dengan mencelupkan seluruh IDCS ke dalam material uji. Dalam hal ini medium 1 dan medium 2 adalah sama yaitu material uji (Gambar 2). Berdasarkan persamaan 3 dan 4, ε_0 merupakan permitivitas ruang hampa, ε_1 merupakan permitivitas material uji dan ε_3 adalah nilai permitivitas substrat. $K(x)$ merupakan fungsi integral dari medan listrik yang berbentuk elips. Beberapa referensi menyebut disebut *complete elliptic integral* jenis pertama. Nilai k merupakan sebuah konstanta yang diperoleh dari persamaan 5.

$$K(x) = \frac{a}{a+b} \quad (5)$$

$$C2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{h}{b} \quad (6)$$

$$Cuc = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 K(\sqrt{1-k^2})}{2 K(k)} + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{h}{b} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 K(\sqrt{1-k^2})}{2 K(k)} \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\frac{Cuc}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_1 K(\sqrt{1-k^2})}{2 K(k)}}{\frac{h}{b} + \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{2 K(k)}} \quad (8)$$

Particle Swarm Optimization merupakan sebuah metode optimasi yang menggunakan prinsip kawanan partikel. Optimasi ini akan terus menerus menghitung calon solusi berdasarkan acuan kualitas. Partikel atau calon solusi akan dioptimasi terus menerus pada ruang permasalahan dengan posisi dan kecepatan partikel yang telah diatur. Setiap iterasi optimasi menghasilkan pergerakan partikel berdasarkan solusi terbaik partikel tersebut yang secara umum didapatkan dari partikel lain. Kawanan partikel yang menuju solusi terbaik ini dinamakan swarm.

Istilah umum yang digunakan pada metode optimasi PSO yaitu:

1. *Particle*: Bentuk individu dari Swarm, setiap partikel mewakili satu solusi
2. *Swarm* : Kawanan partikel
3. *Pbest (Personal best)*: kedudukan atau posisi partikel untuk mendapatkan solusi terbaik
4. *Gbest (Global best)* : kedudukan atau posisi terbaik dari beberapa Pbest
5. *Velocity (v)*: sebuah vektor kecepatan yang menggerakkan partikel menuju solusi terbaik
6. *Inertia weight (θ)*: untuk mengontrol pergerakan partikel dari vektor kecepatan
7. *Learning Rates ($c1$ dan $c2$)* : $c1$ untuk menilai kemampuan partikel, $c2$ untuk menilai kemampuan sosial kawanan

METODE PENELITIAN

A. OPTIMASI MENGGUNAKAN METODE GRADIEN

Beikut adalah contoh penerapan optimasi permitivitas pada sensor IDCs menggunakan metode gradien terhadap parameter N

$$\begin{aligned}\varepsilon_2 &= \left(\frac{C}{\varepsilon_0(N-1)L} - \frac{\varepsilon_2 K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)} \right) \cdot \left(\frac{h}{b} - \frac{K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)} \right)^{-1} \\ \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial N} &= - \frac{C}{\varepsilon_0 L(N-1)^2} \cdot \left(\frac{h}{b} - \frac{K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)} \right)^{-1} \\ \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial N} &= 0 \\ - \frac{C}{\varepsilon_0 L(N-1)^2} \cdot \left(\frac{h}{b} - \frac{K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)} \right)^{-1} &= 0 \\ \frac{\frac{C}{\varepsilon_0 L(N-1)^2}}{\left(\frac{h}{b} - \frac{K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)} \right)} &= 0 \\ \left(\frac{h}{b} - \frac{K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)} \right) &\neq 0, \text{ karena penyebut tidak boleh bernilai } 0\end{aligned}$$

$$\frac{h}{b} \neq \frac{K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)}$$

$$h \neq \frac{b \cdot K(\sqrt{1-(k)^2})}{2K(k)}$$

$$\frac{C}{\varepsilon_0 L(N-1)^2} = 0$$

$$\varepsilon_0 L(N-1)^2 \neq 0$$

$$N-1 \neq 0$$

$$N \neq 1$$

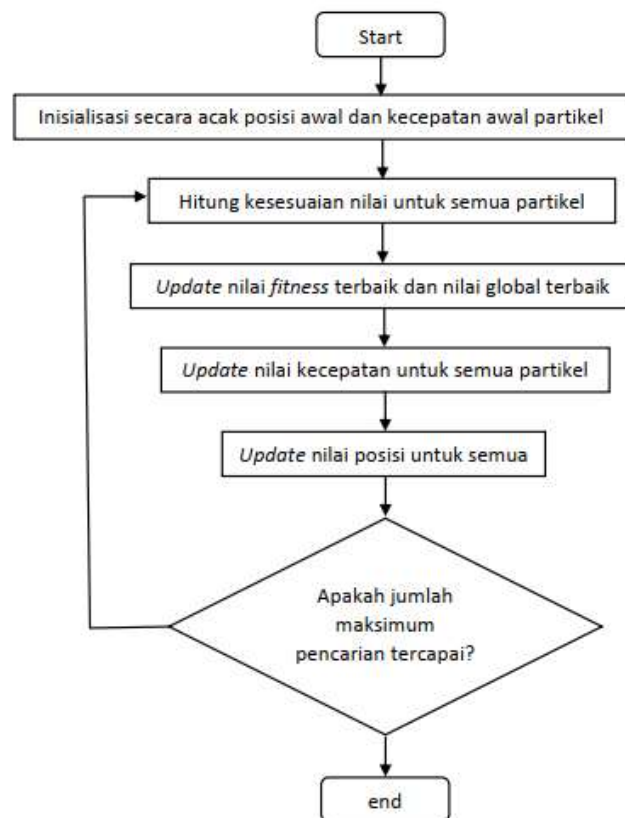
$$N > 1$$

Dengan menggunakan cara yang sama dengan cara diatas, diperoleh batasan untuk variabel panjang elektrode (L) yaitu $L \neq 0$.

B. OPTIMASI MENGGUNAKAN PSO

Tahap ini dimulai dengan menentukan kecepatan dan posisi awal partikel secara acak, kemudian menentukan parameter terbaik algoritma PSO yang meliputi:

1. Jumlah partikel
Partikel yang digunakan pada algoritma ini adalah 500 partikel
2. Kecepatan maksimum
kecepatan Viddi antara -10 sampai 10 (-10,10) dan kecepatan maksimum pada 20.
3. C1 dan c2
Umumnya menggunakan nilai 2, setiap masalah memiliki nilai yang berbeda, range yang bisa digunakan antara 0 - 4.
4. Kondisi berhenti
Kondisi berhenti tergantung pada masalah yang dioptimalkan.
5. Inertia weight
Inertia weight memiliki nilai antara 0.8 – 1.2.



Gambar 3. Flowchart optimasi menggunakan metode PSO

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan uraian langkah pada metode penelitian, hasil optimasi menggunakan gradien diperoleh menggunakan perhitungan. Adapun materi yang diterapkan pada metode ini yaitu materi diferensial. Diferensial orde pertama merupakan turunan dari fungsi $f(x)$ menjadi $f'(x)$. Nilai Optimum suatu fungsi diperoleh dengan membuat persamaan turunan pertama sama dengan 0. Berdasarkan Langkah-langkah tersebut, diperoleh bahwa hasil dari optimasi gradien yaitu : $N \neq 1$, $L \neq 0$, $a \neq 0$, $b \neq 0$. Mengingat ketersediaan bahan dan kemampuan alat pada proses fabrikasi sensor dilingkungan peneliti, ditetapkan batasan ukur pada masing-masing parameter IDCs seperti pada tabel 4. Perlu digaris bawahi bahwa sangat memungkinkan jika batasan pada setiap parameter dapat dibuat lebih kecil lagi jika tersedia bahan dan kemampuan alat yang lebih baik. Desain teknis dari sensor ini selain yang tertera pada Tabel 4 yaitu permitivitas substrat yang digunakan adalah permitivitas FR-4.

Tabel 1. Batas pada optimasi parameter IDCs

Nilai	a	B	N	L
Batas atas	30 mm	30 mm	10	30 mm
Batas bawah	0.5 mm	0.5 mm	2	2 mm

Langkah awal pada proses optimasi menggunakan PSO adalah melakukan uji coba terhadap kinerja algoritma optimasi. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk melakukan uji coba algoritma.

Tabel 2. Persamaan Uji Coba

Uji Coba	Skenario	Fungsi/Sistem Persamaan Nonlinear
1	A	Fungsi Rastrigin
	B	Fungsi Objektif Sinus
	C	Fungsi Powell Quartic
	D	Fungsi Six-Hump Camelback
	E	Fungsi Rosenbrock
2	A	$f_1(x) = (3-5x_1)x_1 + 1 - 2x_2 = 0$ $f_2(x) = (3-5x_i)x_i + 1 - x_{i-1} - 2x_{i+1} = 0$ $i = 2, \dots, 9$ $f_3(x) = (3-5x_{10})x_{10} + 1 - x_9 = 0$
	B	$x_1 + \frac{x_2^2 x_4 x_6}{4} + 0,75 = 0$ $x_2 + 0,405e^{1+x_1 x_2} - 1,405 = 0$ $x_3 - \frac{x_4 x_6}{2} + 1,5 = 0$ $x_4 + 0,605e^{1-x_3^2} + 0,75 = 0$
		$x_5 - \frac{x_4 x_6}{2} + 1,5 = 0$ $x_6 - x_1 x_5 = 0$
	C	$x_1^{x_2} + x_2^{x_1} - 5x_1 x_2 x_3 = 85$ $x_1^3 - x_2^{x_3} - x_3^{x_2} = 60$ $3 \leq x_1 \leq 5, 2 \leq x_2 \leq 4, 0,5 \leq x_3 \leq 2$

Kinerja dari algoritma PSO perlu diuji menggunakan 2 Jenis ujicoba yang tertera pada tabel 1. Hasil pengujian menggunakan PSO dibandingkan dengan hasil pengujian eksak dari setiap fungsi uji coba. Proses uji coba dikatakan berhasil jika hasil uji coba optimasi sama atau mendekati nilai hasil perhitungan eksak. Data masukan pada uji coba ke dua menggunakan persamaan non linear yang bertujuan untuk mengetahui efisiensi algoritma dalam menyelesaikan permasalahan pada persamaan non linear. Suatu persamaan dikatakan linear Ketika persamaan tersebut setiap sukunya memiliki konstanta atau perkalian konstanta dengan variabel tunggal (variabel berpangkat satu). Persamaan dikatakan tidak linear atau non linear ketika pangkat atau derajat dari variabel bebas didalam persamaan tersebut memiliki nilai tidak sama dengan satu dan mengandung nilai fungsi non linear seperti log, ln, sin, cos dan lain sebagainya.

Tabel 3. Data Hasil Uji Coba Algoritma PSO

Skenario	Nilai	Hasil Uji Coba	Hasil Eksak	Iterasi konvergensi
A	x_1	0,0031	0	15
	x_2	-0,0024	0	
	x_3	-0,0005	0	
	x_4	0,0013	0	
	x_5	0,0034	0	
	x_6	-0,0029	0	
	x_7	0,0014	0	
	x_8	0,0012	0	

	x_9	-0,0056	0	
	x_{10}	-0,0000	0	
	$f(x)$	0,0000	0	
B	x_1	5,3621	5,3623	200
	x_2	5,3622	5,3624	
	x_3	5,3630	5,3621	
	x_4	5,3626	5,3633	
	x_5	5,3622	5,3627	
	x_6	5,3623	5,3625	
	x_7	5,3621	5,3624	
	x_8	5,3603	5,3622	
	x_9	5,3678	5,3627	
	x_{10}	5,3494	5,3616	
	$f(x)$	-12,1597	-12,15982	
C	x_1	-0,0003	0	10
	x_2	0,0000	0	
	x_3	0,0000	0	
	x_4	0,0000	0	
	$f(x)$	0,0000	0	
D	x_1	-0,0898	-0,08984	15
	x_2	0,7126	0,71266	
	$f(x)$	-1,0316	-1,0316285	
E	x_1	1,000	1	10
	x_2	1,000	1	
	$f(x)$	1,000	1	

Berdasarkan analisis tabel 2, pengujian algoritma PSO menggunakan uji coba pertama menghasilkan nilai yang hampir sama dengan perhitungan eksak. Uji coba A, B dan C memiliki hasil yang hampir sama namun pada uji coba D dan E menghasilkan nilai yang sama persis. Analisis tersebut membuat kesimpulan bahwa algoritma PSO memiliki kinerja yang bagus dalam mencari solusi pada uji coba pertama.

Tabel 4. Perbandingan hasil uji coba 2

Skenario	Nilai	Hasil Uji Coba	Hasil Eksak	Iterasi konvergensi
A	x_1	-0,1060	-0,3820	50
	x_2	0,3171	-4380	
	x_3	0,8061	-0,4459	
	x_4	-0,0875	-0,4469	
	x_5	-0,0582	-0,4469	
	x_6	0,4479	-0,4463	
	x_7	0,7058	-0,4441	
	x_8	0,0794	-0,4361	
	x_9	0,2780	-0,4078	
	x_{10}	0,7688	-0,3095	
B	x_1	-0,9496	-1	20
	x_2	0,9676	1	
	x_3	-1,0488	-1	
	x_4	0,9378	1	
	x_5	-1,0265	-1	
	x_6	0,9728	1	
C	x_1	4	4	10
	x_2	3	3	
	x_3	1	1	
	x_2	0,8244	0,8244	
	x_3	1,0005	1	

Variabel lain yang perlu diperhatikan pada proses optimasi adalah penentuan jumlah iterasi. Dimana jumlah iterasi minimum yang digunakan disebut iterasi konvergensi. Dengan kata lain iterasi konvergensi merupakan jumlah iterasi maksimum yang dibutuhkan partikel untuk mencari posisi terbaiknya. Iterasi konvergensi dapat dikatakan juga sebagai minimum iterasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan data yang stabil. Setelah melewati proses penelusuran, partikel pada PSO akan menuju daerah penelusuran yang lebih baik. Selain jumlah iterasi, variabel lain yang perlu dimasukkan dalam program komputasi adalah jumlah partikel. Akan tetapi, berdasarkan percobaan peneliti, berapapun jumlah partikel yang digunakan tidak akan mempengaruhi hasil akhir. Jumlah partikel hanya mempengaruhi kecepatan dalam mendapatkan solusi yang paling optimal.

Tabel 5. Riwayat konvergensi algoritma PSO terhadap parameter konfigurasi IDCs

Variabel	Iterasi awal	Setelah iterasi ke-10	Setelah iterasi ke-25	Setelah iterasi ke-50	Setelah iterasi ke-75	Setelah iterasi ke-100	Setelah iterasi ke-500	Setelah iterasi ke-1000
Lebar elektrode (a)	0,0023	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Jarak antara dua elektrode (b)	0,0030	0,0027	0,0016	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
Jumlah elektrode (N)	6,0000	8,0000	8,0000	8,0000	8,0000	8,0000	8,0000	8,0000

Panjang elektrode (L)	0,0450	0,0418	0,0409	0,0401	0,0401	0,0401	0,0401	0,0401
-----------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Nilai pada parameter IDCs tidak mengalami perubahan (stabil) pada iterasi ke-50 hingga iterasi ke -1000. Hal ini menunjukkan bahwa iterasi konvergensi dari persamaan non linear IDCs adalah 50kali. Namun dalam prakteknya, penulis menjalankan algoritma PSO dengan jumlah iterasi 100. Setelah algoritma PSO dijalankan, diperoleh nilai untuk setiap parameter IDCs yang dioptimasi. Data hasil optimasi PSO untuk parameter – parameter konfigurasi IDCs disajikan pada Tabel 5.

Tabel 6. Hasil Optimasi PSO

Nilai	A	b	N	L
maksimum	3 mm	3 mm	7	7 mm
minimum	1 mm	1 mm	3	4 mm
modus	3 mm	3 mm	6	5 mm

KESIMPULAN

Kesimpulan pada penelitian ini yaitu nilai lebar elektroda berkisar antara 1-3 mm, jarak antara dua elektroda 1-3 mm, jumlah elektroda antara 3-7, Panjang elektroda 4-7 mm. Adapun nilai yang sering muncul dengan eror terkecil yaitu $a = 3$, $b = 3$, $N = 6$, $L = 5$.

SARAN

Berdasarkan batasan dan nilai diatas, disarankan untuk melakukan optimasi menggunakan batasan yang bervariasi sesuai ketersediaan bahan dan kemampuan alat dilingkungan peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Vuković Rukavina, A., 2014. Hand-held unit for liquid-type recognition, based on interdigital capacitor Measurement 51, 289–296.
doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.02.012>
- [2] Liang, J.G.et.al. (2018). Thickness effects of aerosol deposited hygroscopic films on ultra – sensitive humidity sensors. Sens. Actuators B.Chem. 265,632-643
- [3] Rukavina, A. V. (2014). Hand-held unit for liquid-type recognition, based on interdigital capacitor. Measurement, 51, 289-296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.02.012>
- [4] Oje, A. I., Ogwu, A., Mirzaeian, M., . (2019). Pseudo-capacitance of silver oxide thin film electrodes in ionic liquid for electrochemical energy applications. Journal of Science: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2019.04.003>
- [5] Rukavina, A. V. (2015). Non-invasive liquid recognition based on interdigital capacitor. Sensors and Actuators. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.03.019>
- [6] Shanmugam, G. (2012). Handbook of Petroleum Exploration and Production. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56335-4.00010-2>
- [7] Muntini, M. S., Pramono, Y. H., & Yustiana. (2014). Modeling of Well Drilling Heating on Crude Oil Using Microwave. *The 4th International Conference on Theoretical and Applied Physics (ICTAP) 2014* (pp. 030011-2-030011- 7). Bali, Indonesia: American Institute of Physics.
- [8] Carlson, J. E., Tomren, A. L., Folgerø, K., & Barth, T. (2014). Estimation of dielectric properties of crude oils based on IR spectroscopy. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.09.001>
- [9] Angkawisittpan, N., & Manasri, T. (2012). Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor. Measurement Science Review, 12(1), 8-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/v10048-012-0002-0>

- [10] Rachmanita, R., & Ahmadi, H. (2019). Aplikasi Interdigital Capacitor Sensor (IDCS) dalam pengukuran permitivitas relatif Crude Oil. Jurnal Pendidikan Fisika dan Keilmuan (JPFK), 5(2), 72-82. doi: <http://dx.doi.org/10.25273/jpfk.v5i2.4011>