

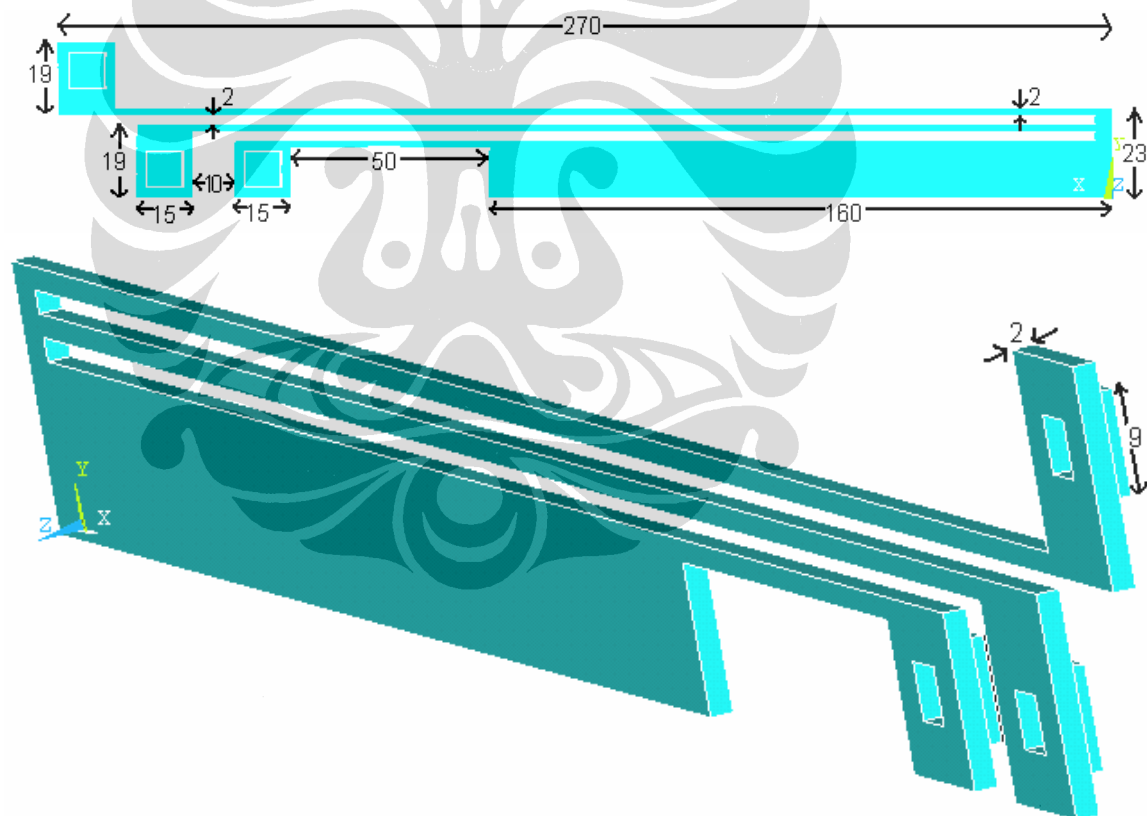
## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN DISKUSI

Dari pembahasan di bab 3 dimana telah didapatkan beberapa persamaan yang menjelaskan tentang analisa disain thermal actuator dengan dua lengan panas baik analisa elektrotermal dan juga analisa mekanik. Pada bab 4 ini akan dibuat simulasi berdasarkan persamaan-persamaan yang telah didapatkan, sehingga nantinya dapat dipergunakan untuk melihat kecenderungan baik dari elektrotermalnya juga dari sisi mekanis dari thermal actuator dengan dua lengan panas.

#### 4.1. SIMULASI ELEKTROTHERMAL

Untuk dapat mensimulasikan distribusi temperatur dari termal aktuator dengan dua lengan panas maka digunakan beberapa parameter. Parameter-parameter yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.1 serta Gambar 4.1.

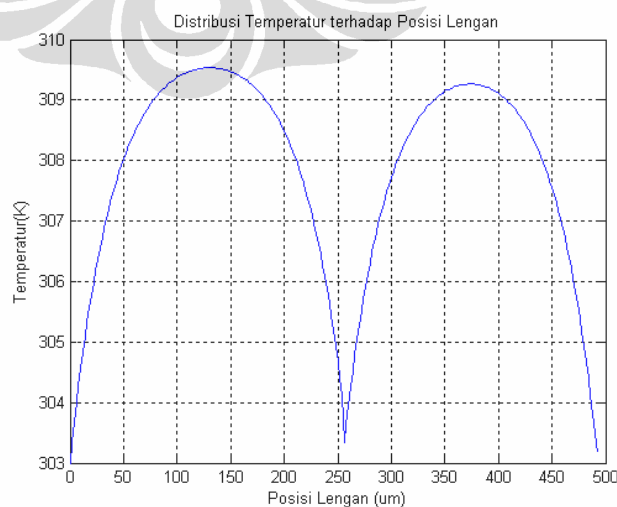


Gambar 4.1 Bentuk dan ukuran (dalam  $\mu\text{m}$ ) disain thermal actuator dengan dua lengan panas

Tabel 4.1 Parameter-parameter bahan

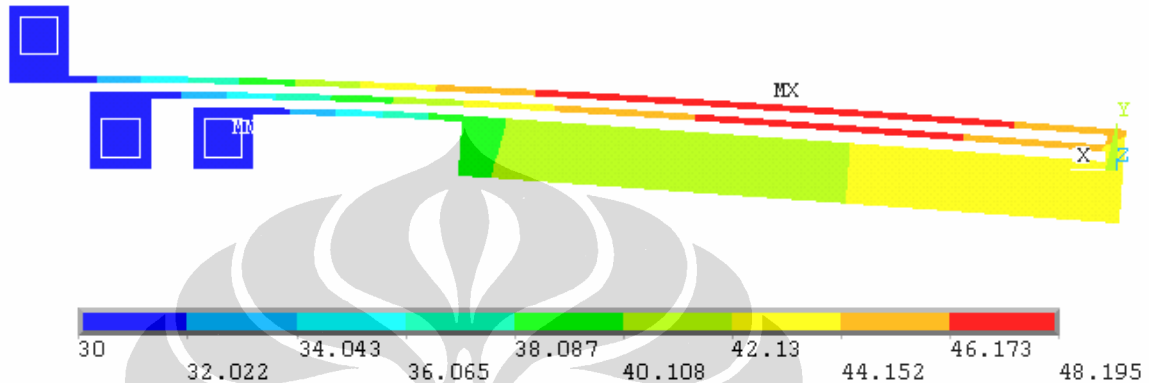
Properti Bahan	Nilai
Modulus Young E	$169 \times 10^9$ Pa
Rasio Poisson $\nu$	0.22
Koefisien ekspansi termal	$2.9 \times 10^{-6}$ C <sup>-1</sup>
Konduktivitas termal polisikon $k_p$	$41 \times 10^{-6}$ W. $\mu$ m <sup>-1</sup> . C <sup>-1</sup>
Konduktivitas termal udara $k_v$	$0.026 \times 10^{-6}$ W. $\mu$ m <sup>-1</sup> . C <sup>-1</sup>
Konduktivitas termal nitrit $k_n$	$2.25 \times 10^{-6}$ W. $\mu$ m <sup>-1</sup> . C <sup>-1</sup>
Resistivitas polisilikon	23 $\Omega\mu$ m

Untuk perhitungan analitik digunakan matlab, dengan menggunakan Persamaan 3.9 dan 3.10 akan didapatkan distribusi temperatur sepanjang lengan panas dalam dan luar untuk tegangan masukan sebesar 1 volt. Dari Gambar 4.2 terlihat bahwa temperatur maksimum terdapat pada bagian tengah lengan panas luar, dari gambar ini juga terlihat bahwa temperatur bagian tengah lengan panas dalam lebih rendah dibanding temperatur maksimum, hal ini disebabkan karena lengan panas dalam lebih pendek dibanding lengan panas luar sehingga hambatan dari lengan panas luar lebih besar dibanding dengan lengan panas dalam. Daerah pertemuan antara lengan panas luar dan lengan panas dalam menunjukkan terjadinya penurunan temperatur. Hal ini terjadi karena daerah tersebut juga terhubung dengan lengan dingin. Lengan dingin berfungsi sebagai penyerap panas sehingga menyebabkan terjadinya penurunan temperatur.



Gambar 4.2 Distribusi temperatur terhadap posisi pada lengan panas hasil perhitungan analitik

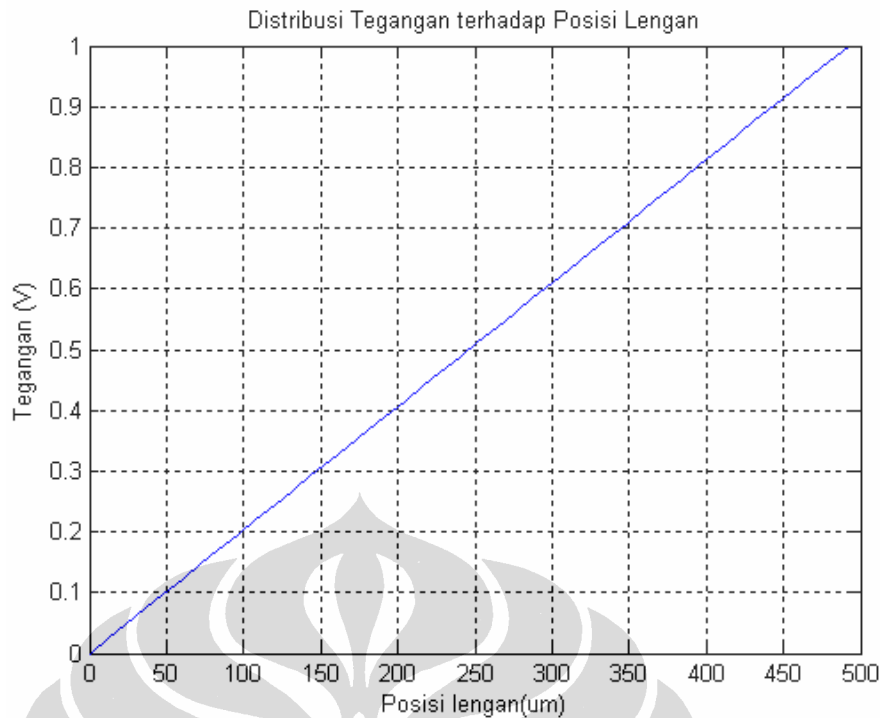
Untuk perhitungan numerik digunakan software Ansys, pada simulasi ini digunakan tiga buah besaran fisis yang nilainya sudah ditetapkan yaitu, tegangan masukan (1 volt), termal dan mekanik. Untuk batasan kondisi elektrik, tegangan listrik di aplikasikan pada lengan panas dan luar. Temperatur pada ketiga *anchor* ditentukan memiliki nilai yang sama dengan temperatur substrat karena ketiganya terhubung dengan substrat. Untuk batasan kondisi mekanik, ketiga *anchor* akan dibuat tetap untuk semua arah.



Gambar 4.3 Distribusi temperatur terhadap posisi pada lengan panas hasil perhitungan numerik

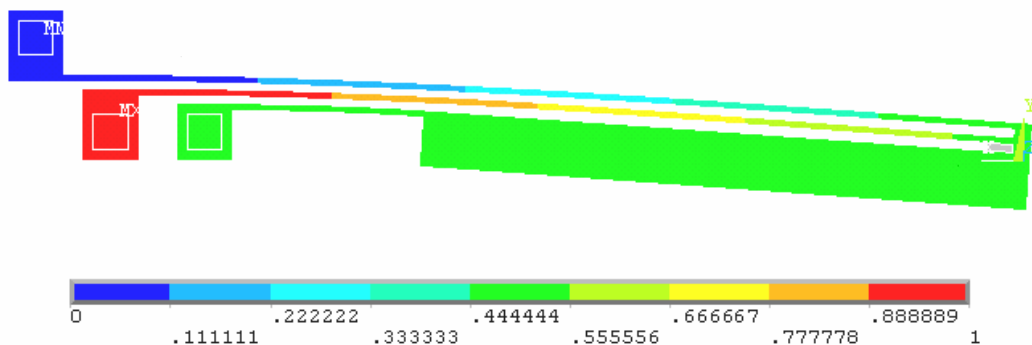
Gambar 4.3 memperlihatkan hasil simulasi distribusi temperatur dari termal aktuator dengan dua lengan panas. Seperti yang didapatkan dari perhitungan analitik yang dilakukan di atas, terlihat bahwa temperatur tertinggi terdapat pada daerah tengah lengan panas luar, sedangkan temperatur terendah terdapat pada *anchor* lengan dingin. Pada daerah pertemuan antara lengan panas luar dan dalam memperlihatkan penurunan temperatur.

Untuk perhitungan analitik distribusi tegangan terhadap posisi pada lengan panas digunakan Persamaan 3.11. Dari hasil perhitungan didapatkan hubungan yang liner antara perubahan tegangan dengan posisi lengan panas. Hal ini bisa di jelaskan dengan diambil titik acuan dari anchor lengan panas dalam, semakin jauh jarak dari titik acuan akan semakin besar hambatan pada posisi tersebut, mengingat bahwa nilai hambatan sebuah penghantar listrik berbanding lurus dengan panjang penghantar tersebut. Dengan nilai hambatan yang semakin besar maka besarnya tegangan yang jatuh pada posisi tersebut juga semakin besar, hal ini disebabkan hubungan antara hambatan dengan tegangan berbanding lurus.



Gambar 4.4 Distribusi Tegangan terhadap posisi lengan dengan metode analitik

Gambar 4.5 memperlihatkan hasil simulasi distribusi tegangan dari termal aktuator dengan dua lengan panas ketika diberikan tegangan masukan sebesar 1V. Dari gambar ini terlihat *anchor* untuk lengan panas dalam dan luar memiliki warna yang berbeda yang menunjukkan beda tegangan antara kedua *anchor* tersebut. Terlihat juga terjadi degradasi perubahan warna diantara kedua *anchor* yang menunjukkan terjadinya penurunan tegangan dari anchor lengan panas dalam menuju anchor lengan panas luar. Sedangkan untuk lengan dingin tegangan yang jatuh padanya besarnya merupakan nilai tengah antara tegangan maksimum dan minimum. Dari kedua jenis perhitungan baik analitik maupun numerik dapat dilihat kecenderungan yang sama dalam distribusi tegangan terhadap posisi pada lengan panas aktuator.



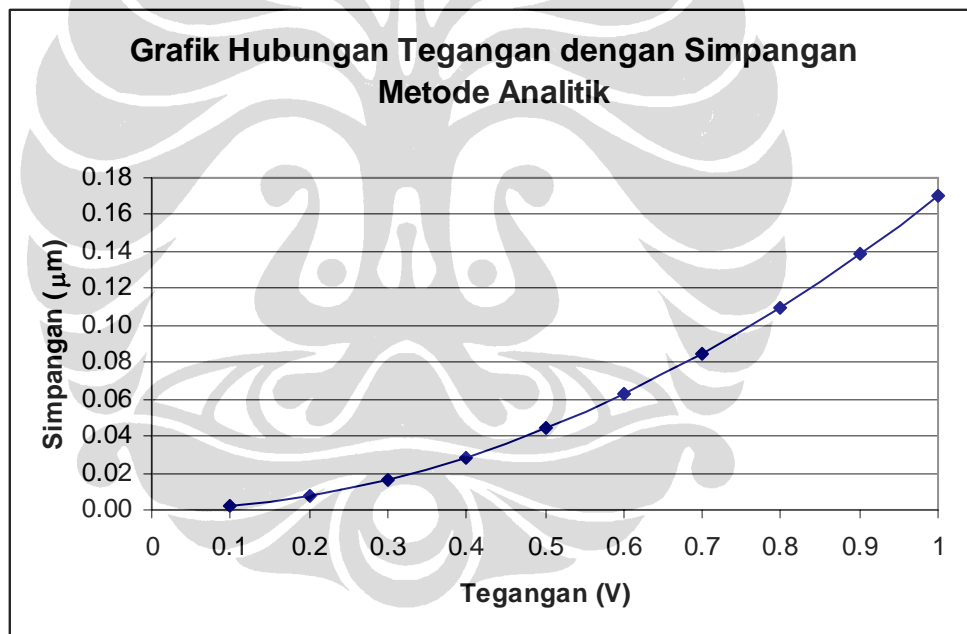
Gambar 4.5 Distribusi tegangan terhadap posisi lengan dengan metode numerik

## 4.2. SIMULASI MEKANIK

Dari hasil perhitungan secara analitik dengan menggunakan Persamaan 3.21 didapatkan hubungan antara tegangan masukan dengan besarnya simpangan. Grafik hubungan antara tegangan masukan dengan besarnya pergeseran dari hasil perhitungan secara analitik dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Tabel 4.2 Data variasi tegangan dengan simpangan metode analitik

Tegangan (V)	Simpangan ( $\mu\text{m}$ )
0.1	0.00167
0.2	0.00669
0.3	0.01506
0.4	0.02677
0.5	0.04184
0.6	0.06027
0.7	0.08207
0.8	0.10724
0.9	0.13580
1.0	0.16774



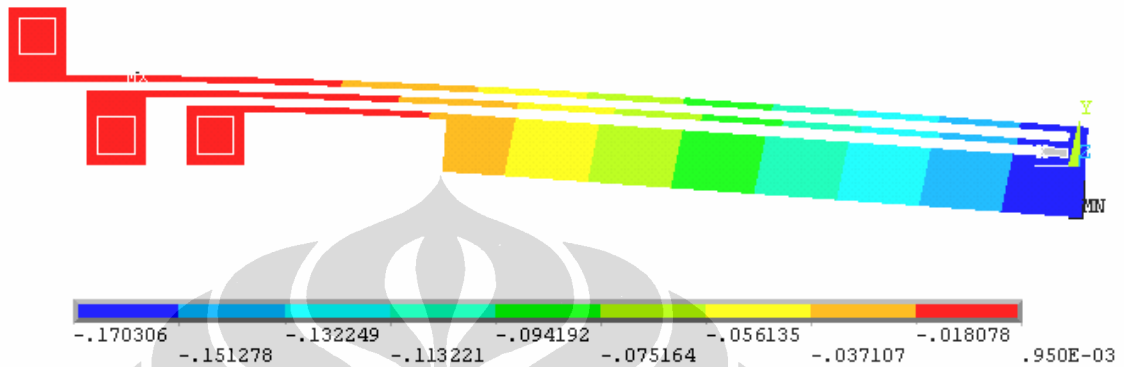
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Tegangan dengan Simpangan Metode analitik

Untuk perhitungan numerik digunakan software Ansys. Data diambil pada tegangan antara 0-1 V untuk setiap kenaikan tegangan 0,1 volt. Gambar 4.7 memperlihatkan salah satu data hasil pengambilan dari metode numerik, dimana data ini diambil ketika tegangan masukan sebesar 1 V

1

```

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY      (AVG)
RSYS=0
DMX =.170835
SMN =-.170306
SMX =.950E-03
    
```

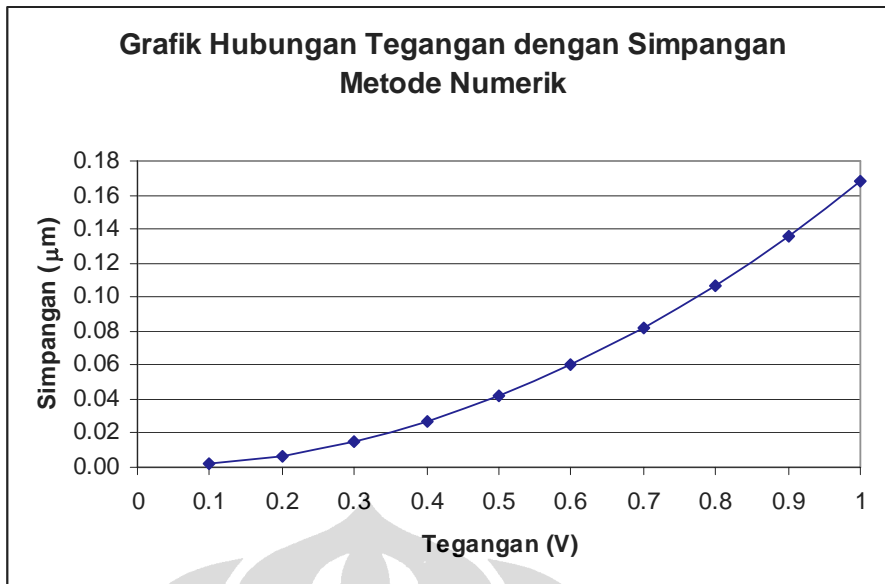


Gambar 4.7 Grafik hubungan Tegangan masukan (1V) dengan simpangan.

Grafik hubungan antara tegangan masukan dengan besarnya pergeseran dari hasil perhitungan secara numerik dapat dilihat pada Gambar 4.8 di bawah ini.

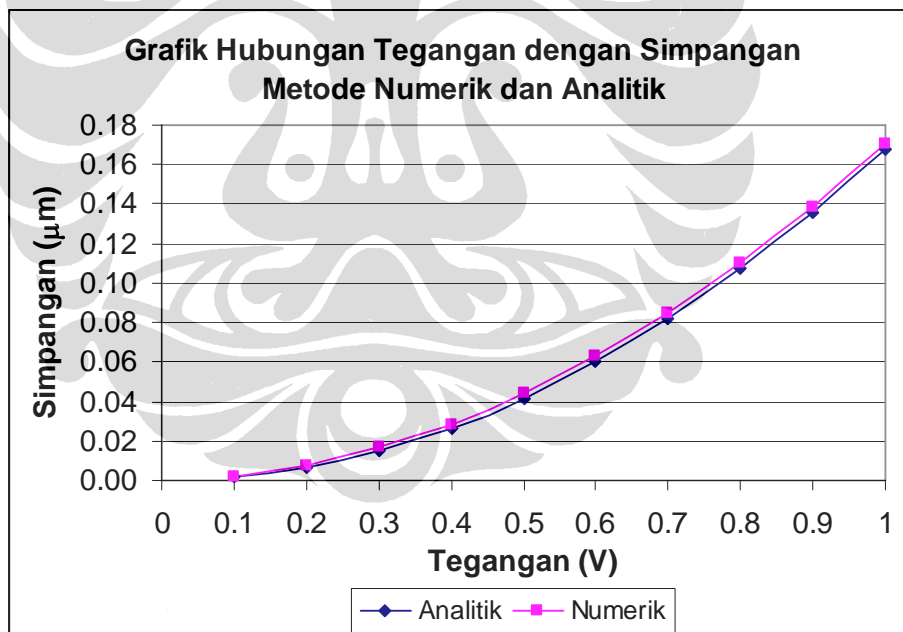
Tabel 4.3 Data variasi tegangan dengan simpangan metode numerik

Tegangan (V)	Simpangan ( $\mu\text{m}$ )
0.1	0.002234
0.2	0.007256
0.3	0.016621
0.4	0.028335
0.5	0.044406
0.6	0.062832
0.7	0.084612
0.8	0.109806
0.9	0.13836
1	0.170306



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Tegangan dengan Simpangan Metode numerik

Dari kedua jenis hasil perhitungan didapatkan nilai pertambahan simpangan untuk setiap pertambahan tegangan dari 0 sampai 1 volt memiliki kecenderungan nilai yang hampir sama, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.



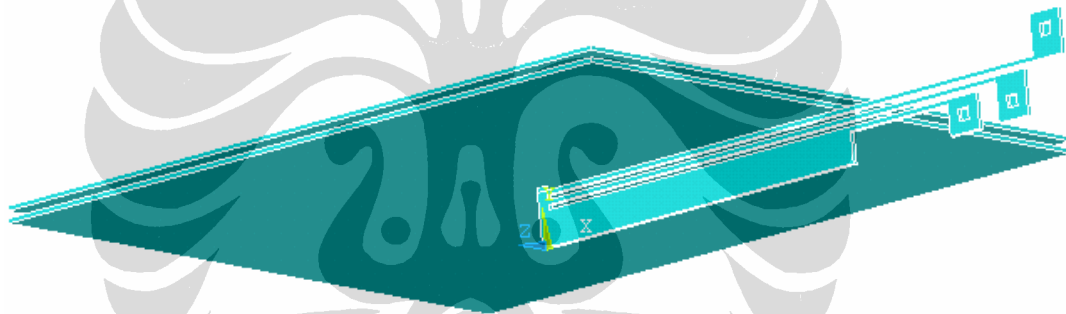
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Tegangan dengan Simpangan Metode numerik

Meskipun demikian masih ada perbedaan yang terdapat pada kedua jenis perhitungan tersebut, hal ini disebabkan dalam perhitungan analitik untuk menyelesaikan persamaan nonlinier pada Persamaan 3.7 digunakan persamaan deret taylor, dimana pendekatan yang dilakukan tidak cukup baik untuk dapat mewakili seluruh persamaan non-linier.

### 4.3. PERHITUNGAN KAPASITAS KAPASITOR

Dari data simpangan yang telah diperoleh selanjutnya dapat ditentukan ukuran dari keping sejajar yang akan dipergunakan sebagai kapasitor. Untuk mempermudah perhitungan kapasitas kapasitor maka akan dipergunakan data hasil perhitungan analitik, mengingat dari kedua data yang dihasilkan baik secara analitik maupun numerik memiliki kecenderungan data yang sama.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat maka pengambilan data simpangan dilakukan dengan meningkatkan sampel data, data antara 0-1 V akan diambil untuk setiap kenaikan 0,01 V untuk di ambil besar simpangan yang terjadi. Dari data-data simpangan ini dan dengan menggunakan Persamaan 2.13 maka dapat ditentukan luas penampang keping serta jarak awal antar keping sejajar yang akan menghasilkan nilai kapasitas kapasitor yang sesuai dengan spesifikasi dari VCO yang digunakan (Gambar 2.12). Dari hasil perhitungan didapatkan luas penampang yang cocok untuk disain ini adalah  $500^2 \mu\text{m}^2$ .



Gambar 4.10 Rancangan aktuator termal

Dengan memasukkan variabel data yang telah diketahui dan dengan menggunakan Persamaan 2.13 maka didapatkan variasi kapasitas kapasitor terhadap tegangan masukan (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Variasi Kapasitas kapasitor terhadap Tegangan masukan

Tegangan (V)	Simpangan ( $\mu\text{m}$ )	Kapasitas Kapasitor	
		Farad	
0,00	0,000000	2,213E-09	2,213 nF
0,01	0,000017	2,176E-09	2,176 nF
0,02	0,000067	2,074E-09	2,074 nF
0,03	0,000151	1,923E-09	1,923 nF
0,04	0,000268	1,745E-09	1,745 nF
0,05	0,000418	1,560E-09	1,56 nF
0,06	0,000602	1,381E-09	1,381 nF
0,07	0,000820	1,216E-09	1,216 nF
0,08	0,001070	1,069E-09	1,069 nF
0,09	0,001355	9,396E-10	939,61 pF



Tegangan (V)	Simpangan ( $\mu\text{m}$ )	Kapasitas Kapasitor	
		Farad	
0,11	0,002024	7,317E-10	731,695 pF
0,12	0,002409	6,491E-10	649,113 pF
0,13	0,002827	5,782E-10	578,19 pF
0,14	0,003278	5,172E-10	517,157 pF
0,15	0,003763	4,645E-10	464,489 pF
0,16	0,004282	4,189E-10	418,883 pF
0,17	0,004834	3,792E-10	379,249 pF
0,18	0,005419	3,447E-10	344,664 pF
0,19	0,006038	3,144E-10	314,351 pF
0,20	0,006691	2,877E-10	287,685 pF
0,21	0,007377	2,641E-10	264,129 pF
0,22	0,008096	2,432E-10	243,241 pF
0,23	0,008849	2,246E-10	224,647 pF
0,24	0,009635	2,080E-10	208,038 pF
0,25	0,010455	1,931E-10	193,147 pF
0,26	0,011308	1,798E-10	179,761 pF
0,27	0,012195	1,677E-10	167,677 pF
0,28	0,013115	1,567E-10	156,748 pF
0,29	0,014069	1,468E-10	146,825 pF
0,30	0,015056	1,378E-10	137,799 pF
0,31	0,016077	1,296E-10	129,56 pF
0,32	0,017131	1,220E-10	122,029 pF
0,33	0,018219	1,151E-10	115,12 pF
0,34	0,019340	1,088E-10	108,776 pF
0,35	0,020495	1,029E-10	102,931 pF
0,36	0,021684	9,754E-11	97,536 pF
0,37	0,022905	9,255E-11	92,554 pF
0,38	0,024161	8,793E-11	87,934 pF
0,39	0,025450	8,365E-11	83,648 pF
0,40	0,026772	7,967E-11	79,667 pF
0,41	0,028128	7,596E-11	75,958 pF
0,42	0,029518	7,250E-11	72,498 pF
0,43	0,030941	6,927E-11	69,268 pF
0,44	0,032398	6,625E-11	66,246 pF
0,45	0,033888	6,342E-11	63,417 pF
0,46	0,035412	6,076E-11	60,763 pF
0,47	0,036969	5,827E-11	58,271 pF
0,48	0,038560	5,593E-11	55,928 pF
0,49	0,040185	5,372E-11	53,721 pF
0,50	0,041843	5,164E-11	51,642 pF
0,51	0,043535	4,968E-11	49,68 pF
0,52	0,045260	4,783E-11	47,827 pF
0,53	0,047019	4,608E-11	46,076 pF
0,54	0,048811	4,442E-11	44,418 pF
0,55	0,050638	4,285E-11	42,846 pF
0,56	0,052497	4,136E-11	41,357 pF
0,57	0,054391	3,994E-11	39,943 pF
0,58	0,056318	3,860E-11	38,6 pF

Tegangan (V)	Simpangan ( $\mu\text{m}$ )	Kapasitas Kapasitor	
		Farad	
0,60	0,060273	3,611E-11	36,109 pF
0,61	0,062301	3,495E-11	34,952 pF
0,62	0,064363	3,385E-11	33,849 pF
0,63	0,066459	3,280E-11	32,798 pF
0,64	0,068588	3,179E-11	31,794 pF
0,65	0,070750	3,084E-11	30,836 pF
0,66	0,072947	2,992E-11	29,92 pF
0,67	0,075177	2,904E-11	29,044 pF
0,68	0,077441	2,821E-11	28,206 pF
0,69	0,079739	2,740E-11	27,403 pF
0,70	0,082070	2,663E-11	26,634 pF
0,71	0,084435	2,590E-11	25,897 pF
0,72	0,086834	2,519E-11	25,19 pF
0,73	0,089267	2,451E-11	24,511 pF
0,74	0,091733	2,386E-11	23,859 pF
0,75	0,094234	2,323E-11	23,232 pF
0,76	0,096767	2,263E-11	22,63 pF
0,77	0,099335	2,205E-11	22,051 pF
0,78	0,101940	2,149E-11	21,493 pF
0,79	0,104570	2,096E-11	20,958 pF
0,80	0,107240	2,044E-11	20,441 pF
0,81	0,109940	1,994E-11	19,943 pF
0,82	0,112680	1,946E-11	19,463 pF
0,83	0,115450	1,900E-11	19 pF
0,84	0,118260	1,855E-11	18,552 pF
0,85	0,121100	1,812E-11	18,12 pF
0,86	0,123970	1,770E-11	17,704 pF
0,87	0,126870	1,730E-11	17,303 pF
0,88	0,129810	1,691E-11	16,914 pF
0,89	0,132790	1,654E-11	16,537 pF
0,90	0,135800	1,617E-11	16,173 pF
0,91	0,138840	1,582E-11	15,822 pF
0,92	0,141910	1,548E-11	15,482 pF
0,93	0,145020	1,515E-11	15,152 pF
0,94	0,148170	1,483E-11	14,832 pF
0,95	0,151350	1,452E-11	14,522 pF
0,96	0,154560	1,422E-11	14,223 pF
0,97	0,157800	1,393E-11	13,933 pF
0,98	0,161080	1,365E-11	13,651 pF
0,99	0,164400	1,338E-11	13,377 pF
1,00	0,167740	1,311E-11	13,112 pF

Dari data yang telah diperoleh terlihat bahwa hanya tiga buah kapasitas kapasitor yang dapat dipenuhi oleh disain ini yaitu kapasitas kapitor 33pF, 100 pF dan 330pF, dimana untuk dapat menghasilkan kapasitas sebesar 33pF diperlukan tegangan

masukannya sebesar 0,62V, untuk kapasitas sebesar 100pF diperlukan tegangan masukannya sebesar 0,35V dan untuk kapasitas 330pF diperlukan tegangan masukannya sebesar 0,18V. Keterbatasan variasi dari kapasitor ini disebabkan karena bentuk dari variabel kapasitor hanya berupa dua buah keping sejajar. Untuk mendapatkan kapasitas kapasitor yang nilainya lebih kecil dibutuhkan variasi desain dari keping kapasitor.

Dari data yang diperoleh terlihat bahwa hubungan antara tegangan masukan dengan kapasitas kapasitor yang dihasilkan tidak linier, hal ini lebih disebabkan karena faktor geometris dari rancangan termal aktuator itu sendiri. Dari hasil perhitungan distribusi panas terlihat bahwa kedua lengan panas memiliki temperatur yang berbeda sehingga pertambahan panas untuk kedua lengan tersebut juga akan berbeda sehingga meskipun kedua lengan tersebut terbuat dari bahan yang sama (polisilikon) selisih pertambahan panjang antar kedua lengan panas tidak linier. Perbedaan pertambahan panjang pada kedua lengan panas ini menyebabkan pergerakan simpangan dari aktuator ini tidak linier terhadap perubahan tegangan masukannya. Hubungan antara simpangan aktuator dengan tegangan yang tidak linier menyebabkan hubungan antara tegangan masukannya dengan kapasitas kapasitor juga tidak linier.