

Pengaruh Force dan Perubahan Dimensi Terhadap Karakteristik Microcantilever

As'ad Shidqy Aziz¹, Jendra Sesoca², Brahma Ratih Rahayu Fakhrunnia³, Nurin Fitriana⁴

^{1,2,3,4} Universitas Wisnuwardhana, Malang, Indonesia

Article Info

Article history:

Diterima 23 Desember 2023

Revisi 4 Januari 2024

Diterbitkan 5 April, 2024

Keywords:

Mirocantilever

Displacement

Frekuensi

ABSTRAK

Sistem mikro-elektromekanis (MEMS) adalah teknologi proses yang digunakan untuk membuat perangkat kecil perangkat atau sistem terintegrasi yang menggabungkan komponen mekanik dan listrik. Komponen tersebut dibuat menggunakan teknik pemrosesan batch sirkuit terpadu (IC) dan dapat berkisar dari beberapa mikrometer sampai milimeter. *Microcantilever* banyak diaplikasikan dalam sensor kimia dan biologi karena sensitifitasnya. Dalam satu dekade terakhir *Microcantilever* telah menjadi begitu populer karena sensitivitas yang tinggi, kemudahan dalam fabrikasi dan fleksibilitas jika diterapkan pada chipsirkuit. Juga sangat diminati karena kemudahan dalam mengkalibrasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah mengubah force dan dimensi pada *Microcantilever*. Tujuan dari Penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari sebuah *Microcantilever* karena karakteristik tersebut sangat dibutuhkan sebelum melakukan perancangan sebuah sensor berbasis *Microcantilever*. Dari hasil simulasi nilai *displacement* yang dihasilkan pada mikrokantilever adalah $5,31 \times 10^{-10}$ mm apabila menggunakan force 4N; $6,64 \times 10^{-10}$ mm apabila menggunakan force 5N; dan $7,97 \times 10^{-10}$ mm apabila menggunakan force 6N. Ketebalan pada saat perancangan mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh mikrokantilever. ketebalan $0,75 \mu\text{m}$ menghasilkan frekuensi sebesar 0,31 MHz, ketebalan $1,5 \mu\text{m}$ menghasilkan frekuensi sebesar 0,61 MHz dan ketebalan $3 \mu\text{m}$ menghasilkan frekuensi 1,218 MHz.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

As'ad Shidqy Aziz

Universitas Wisnuwardhana, Jl. Danau Sentani Raya No.99, Malang (65139), Indonesia

Email: asaziz19@wisnuwardhana.ac.id

1. PENDAHULUAN (10 PT)

Sistem mikro-elektromekanis (MEMS) adalah teknologi proses yang digunakan untuk membuat perangkat kecil perangkat atau sistem terintegrasi yang menggabungkan komponen mekanik dan listrik[1]. Sistem mikroelektromekanis (MEMS) melibatkan inovasi perangkat kecil yang dapat mewakili model sebagai sensor atau actuator [2]. Komponen tersebut dibuat menggunakan teknik pemrosesan batch sirkuit terpadu (IC) dan dapat berkisar dari beberapa mikrometer sampai milimeter. Perangkat ini (atau sistem ini) memiliki kemampuan untuk merasakan, mengontrol dan menggerakkan pada skala mikro, dan menghasilkan efek pada skala makro. Dalam bentuk yang paling umum, MEMS terdiri dari mikrostruktur mekanik, mikrosensor, mikroaktuator dan mikroelektronika, semuanya terintegrasi ke dalam chip silikon yang sama [3][4].

Teknologi MEMS berbasis pada teknologi silikon atau fabrikasi semikonduktor[5]. Selain silikon, alternatif substrat seperti logam, kaca / kuarsa, keramik, plastik, dan karet silikon yang lebih populer[6]. Perubahan substrat ini bertujuan untuk melakukan pengembangan atau inovasi terhadap pembuatan alat-alat yang menggunakan bio sensor yang kompatibel dengan bahan substrat yang lebih terjangkau, selain itu dapat juga mempermudah dalam proses fabrikasinya. Walaupun demikian, sebagai *device* (perangkat) yang ada masih menggunakan bahan silikon dalam pembuatan substratnya dikarenakan mempertimbangkan sifat mekanik dan kelistrikannya. [7].

Proses fabrikasi dalam MEMS dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam diantaranya *bulk micromachining*, *surface micromachining* dan *high aspect ratio micromachining*. Proses *bulk micromachining* terdiri dari pembentukan struktur pada substrat silikon, sedangkan *surface micromachining* lapisan-lapisan mikromekanis dibentuk dari lapisan-lapisan dan film-film yang dideposisikan pada permukaan silikon [8][9].

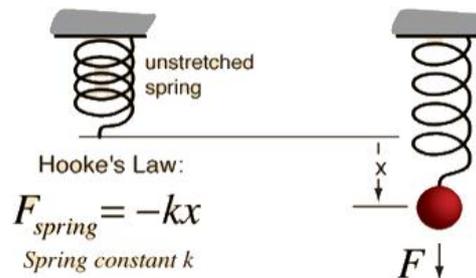
Pada perkembangannya saat ini, mikrokantilever banyak diaplikasikan dalam sensor kimia dan biologi karena sensitifitasnya yang tinggi[10]. Mikrokantilever merupakan sebuah struktur mekanik yang berbasis teknologi MEMS atau disebut *Micro Electro Mechanical Systems* dimana pada sistem ini menggunakan metode titik gaya (*force probes*) pertama pada sistem AFM (*Atomic Force Microscopy*). Beberapa peneliti telah membuktikan tentang kemampuan daya sensitivitas yang tinggi mikrokantilever pada beberapa faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan tekanan. Tim riset yang berasal dari kolaborasi IBM dan Oak Ridge National Laboratory menerapkan mikrokantilever pada aplikasi biosensor pada tahun 1994 [11]. Selain itu, Penerapan mikrokantilever pada biosensor juga dilakukan oleh Tian et al. pada tahun 2020 dan Liu et al pada tahun 2023[12]. Dalam satu dekade terakhir mikrokantilever telah menjadi begitu populer karena sensitivitas yang tinggi, kemudahan dalam fabrikasi dan fleksibilitas jika diterapkan pada chipsirkuit. Juga sangat diminati karena kemudahan dalam mengkalibrasi [13].

Berdasarkan pembahasan diatas, terdapat banyak keunggulan dari mikrokantilever maka dari itu pengetahuan terhadap karakteristik mikrokantilever sangat dibutuhkan sebelum melakukan perancangan sebuah sensor berbasis mikrokantilever. Pada penelitian ini akan mengangkat tema tentang pengaruh perubahan dimensi terhadap karakteristik mikrokantilever dengan tujuan untuk memberikan pengetahuan tentang faktor – faktor yang mempengaruhi perubahan karakteristik mikrokantilever khususnya displacement dan frekuensi.

2. METODE

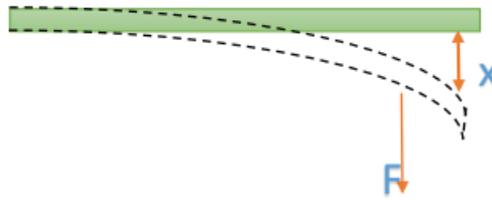
2.1. Displacement Mikrokantilever

Nilai displacement dalam sebuah mikrokantilever adalah nilai perubahan defleksi dari kantilever yang disebabkan oleh adanya sebuah gaya atau disebut force. Dasar dari penentuan nilai displacement dari mikrokantilever diadopsi dari hukum *Hooke's law*. *Hooke's law* adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung perubahan x dari sebuah spring setelah diberi sebuah gaya *Force*. Gambar dari hukum *Hooke's law* ditunjukkan dalam Gambar 1 [14].



Gambar 1. Hooke's Law

Dari Gambar 1 pada *spring* sebelah kiri adalah spring yang sebelum meregang. Ketika spring mendapatkan gaya sebesar F maka akan ada perubahan regangan antara spring sebelah kiri sebelum mendapatkan gaya “ F ” dengan spring sebelah kanan setelah diberi gaya “ F ”. Perubahan jarak antara spring sebelum diberi dan sesudah mendapatkan gaya F dinamakan sebagai variabel x atau jika diaplikasikan kedalam sebuah percobaan mikrokantilever disebut sebagai perubahan displacement. Penerapan hukum hooke's law ini jika diaplikasikan dalam mikrokantilever dapat dilihat dalam Gambar 2.



Gambar 2. Penerapan Hooke's Law pada Mikrokantilever

Persamaan dari hooke's law jika diterapkan pada mikrokantilever ditunjukkan dalam Pers 1.

$$F = k \cdot x \quad (1)$$

dimana

$$k = \frac{Ewt^3}{4L^3} \quad (2)$$

Keterangan :

k: konstanta

F : Force

x : displacement

t : Ketebalan Kantiliver

E : Young Modulus Bahan

w : lebar kantiliver

L : Panjang Kantiliver

2.2. Frekuensi Mikrokantiliver

Dalam setiap benda yang bergetar akan muncul sebuah frekuensi alami. Begitu juga dengan sebuah mikrokantilever. Frekuensi alami yang di timbulkan oleh sebuah mikrokantilever disebut dengan nilai eigen. Dimana nilai eigen ini merupakan nilai dari kuadrat frekuensi dari sebuah mikrokantilever (ω). Penentuan penghitungan nilai frekuensi dari sebuah mikrokantilever dipengaruhi dari bentuk displacement dari mikrokantilever [15]. Penghitungan nilai frekuensi pada mikrokantilever ditunjukkan dalam Pers 3.

$$\omega_n = \frac{\beta n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3)$$

Keterangan :

ω_n : Nilai Frekuensi dalam rad/s

β_n : Nilai beta ke - n

L : Lebar Kantiliver

E : Young Modulus bahan kantiliver

I : Momen Inertia

ρ : Density bahan kantiliver

A : Luas sisi depan kantiliver

Sedangkan apabila Pers 4 jika diubah dalam satuan Hz ditunjukkan dalam persamaan berikut

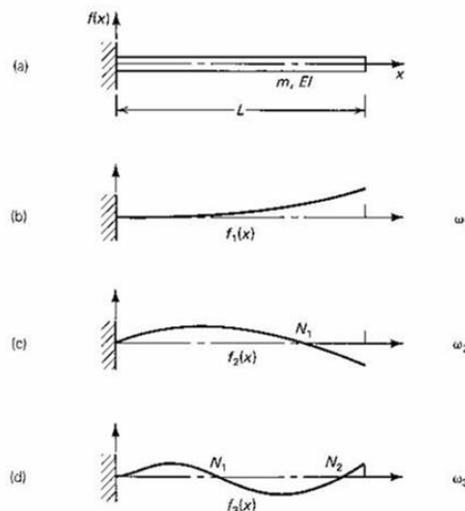
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\beta n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (4)$$

Besarnya nilai β_n dari Pers 4 dapat dilihat dalam Tabel 1

Tabel 1. nilai β_n [2]

n	β_n
1	1,875
2	4,69409
3	7,8539

Besarnya nilai β_n yang dipakai pada persamaan ditentukan oleh bentuk dari perubahan *displacement* yang digunakan dalam mikrokantilever pada simulasi Elmer. Dengan mengetahui bentuk perubahan *displacement* kita dapat menentukan frekuensi keberapa yang akan kita hitung dan memakai nilai β yang sesuai. Beberapa bentuk dari perubahan *displacement* dapat dilihat dalam Gambar 3 [16].

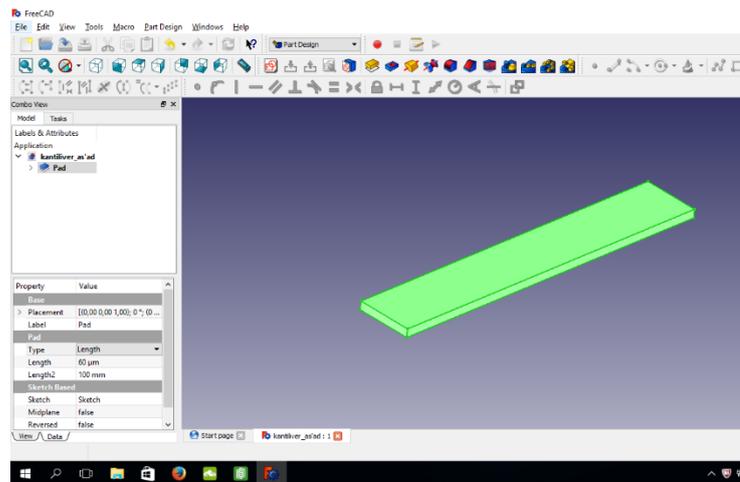
Gambar 3. Bentuk Perubahan *Displacement* dari Cantiliver

2.3. Spesifikasi Desain

Langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk merealisasikan simulasi dari mikrokantilever adalah penentuan spesifikasi dalam mendesain mikrokantilever, parameter dan desain, hasil simulasi, pengambilan kesimpulan. Penentuan spesifikasi ditetapkan terlebih dahulu sebagai acuan dalam mendesain selanjutnya. Spesifikasi mikrokantilever yang direncanakan yaitu :

- Software yang digunakan untuk mendesai dan mensimulasikan mikrokantilever adalah Freecad dan ElmerGUI.
- Dimensi Mikrokantilever yang digunakan yaitu dengan panjang $60 \mu\text{m}$, lebar $10 \mu\text{m}$ dan ketebalan $1,5 \mu\text{m}$.
- Besar force yang dipakai untuk simulasi displacement yaitu 4N , 5N dan 6N .
- Material bahan yang digunakan pada mikrokantilever adalah Silicone Solid.
- Ketebalan yang digunakan untuk simulasi frekuensi mikrokantilever adalah $0,75 \mu\text{m}$; $1,5 \mu\text{m}$; dan $3 \mu\text{m}$.

Dalam mendesain mikrokantilever pada penelitian ini menggunakan software freecad. Fungsi dari software ini adalah untuk mendesain bentuk dan dimensi dari mikro kantiliver.. Hasil desain menggunakan Freecad disimpan dalam format “.step” agar dapat dibuka dan disimulasikan pada software ElmerGUI. Desain mikrokantilever ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Desain Mikrokantilever

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat dua simulasi yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari mikrokantilever yang pertama pengaruh force terhadap *displacement* yang dihasilkan oleh mikrokantilever, kedua pengaruh perubahan dimensi mikro kantilever terhadap frekuensi yang dihasilkan oleh mikrokantilever.

3.1. Pengaruh *force* terhadap *Displacement*

Tujuan dari simulasi *displacement* pada penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari perubahan nilai *force* terhadap *displacement* pada mikrokantilever dan membuktikan kesesuaian penerapan *hooke's law* dengan hasil simulasi *displacement* yang disimulasikan menggunakan software Elmer. Beberapa hal yang harus dilakukan untuk simulasi *displacement* diantaranya menentukan bahan yang dipakai dalam mikrokantilever, memasukkan nilai *force* yang dipakai dalam simulasi, menentukan sisi mikrokantilever yang akan digunakan sebagai *wall* dan sisi yang akan dikenakan *force*.

3.1.1. Hasil Penghitungan Teori

Penghitungan secara teori dilakukan dengan menggunakan persamaan *hooke's law* pada Pers 1 dan Pers 2. Besar *force* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 4N, 5N dan 6N. Berikut hasil penghitungan menggunakan tiga nilai *force* yang berbeda :

1. Force 4 N

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{Ewt^3}{4L^3} \\
 &= \frac{185 \times 10^9 \cdot 10 \cdot (1,5)^3}{4 \cdot (60)^3} \\
 &= \frac{1850 \cdot 3,375}{4 \cdot 216000} \\
 &= \frac{6243,75 \times 10^9}{864000} \\
 &= 7,22656 \times 10^6
 \end{aligned}$$

$$F = k \cdot x, \quad x = \frac{F}{k}$$

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{4}{7,22656 \times 10^6} \\
 &= 5,54 \times 10^{-7} \mu\text{m} = 5,54 \times 10^{-10} \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Nilai *displacement* yang dihasilkan dari *force* 4N yaitu $5,54 \times 10^{-10} \text{ mm}$.

2. Force 5 N

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{Ewt^3}{4L^3} \\
 &= \frac{185 \times 10^9 \cdot 10 \cdot (1,5)^3}{4 \cdot (60)^3} \\
 &= \frac{1850 \cdot 3,375}{4 \cdot 216000} \\
 &= \frac{6243,75 \times 10^9}{864000} \\
 &= 7,22656 \times 10^6
 \end{aligned}$$

$$F = k \cdot x, \quad x = \frac{F}{k}$$

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{5}{7,22656 \times 10^6} \\
 &= 6,92 \times 10^{-7} \mu m = 6,92 \times 10^{-10} mm
 \end{aligned}$$

Nilai displacemet yang dihasilkan dari force 5N yaitu $6,92 \times 10^{-10} mm$.

4. Force 6 N

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{Ewt^3}{4L^3} \\
 &= \frac{185 \times 10^9 \cdot 10 \cdot (1,5)^3}{4 \cdot (60)^3} \\
 &= \frac{1850 \cdot 3,375}{4 \cdot 216000} \\
 &= \frac{6243,75 \times 10^9}{864000} \\
 &= 7,22656 \times 10^6
 \end{aligned}$$

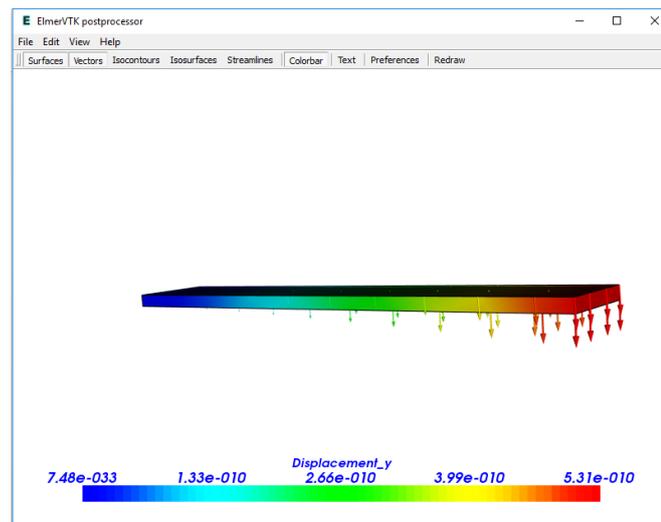
$$F = k \cdot x, \quad x = \frac{F}{k}$$

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{6}{7,22656 \times 10^6} \\
 &= 8,3 \times 10^{-7} \mu m = 8,3 \times 10^{-10} mm
 \end{aligned}$$

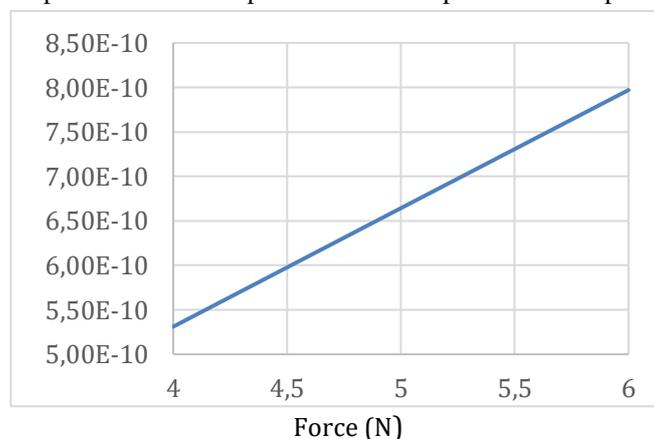
Nilai displacemet yang dihasilkan dari force 6N yaitu $8,3 \times 10^{-10} mm$

3.1.2. Hasil Simulasi Elmer

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan tiga nilai force yaitu 4N, 5N, dan 6N. Besarnya nilai displacement yang dihasilkan dapat dilihat menggunakan elmer VTK. Perubahan displacement ditandai dengan panah kebawah pada mikrokantilever. Semakin panjang arah panah kebawah yang dihasilkan pada elmer VTK maka semakin besar nilai displacement yang dihasilkan pada sisi mikrokantilever tersebut. Salah satu hasil simulasi dari dapat dilihat dalam Gambar 5.

Gambar 5. Hasil *Displacement Force 4N*

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 5, nilai displacement terbesar berada pada ujung dari mikrokantilever. Besarnya nilai displacement dapat ditentukan dengan melihat colorbar pada sumbu y yang merupakan arah displacement pada mikrokantilever. Nilai displacement yang dihasilkan pada mikrokantilever adalah $5,31 \times 10^{-10}$ mm jika menggunakan force sebesar 4N, $6,64 \times 10^{-10}$ mm jika menggunakan force sebesar 5N dan $7,97 \times 10^{-10}$ mm jika menggunakan force sebesar 6N. Jika ketiga hasil dari simulasi displacement mikrokantilever dibuat sebuah grafik sesuai dengan nilai force yang dipakai maka akan didapatkan hubungan antara force dan displacement adalah linear. Dimana apabila force semakin besar maka nilai dari displacement juga akan semakin besar pula. Grafik perubahan nilai displacement terhadap nilai force dapat dilihat dalam Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Perubahan Displacement Terhadap Force

3.2. Pengaruh ketebalan mikrokantilever terhadap frekuensi

Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan dimensi pada mikrokantilever khususnya ketebalannya terhadap nilai frekuensi mikrokantilever yang dihasilkan. Ketebalan yang digunakan yaitu adalah $0,75 \mu\text{m}$, $1,5 \mu\text{m}$ dan $3 \mu\text{m}$. Salah satu hasil frekuensi menggunakan ketebalan $1,5 \mu\text{m}$ dapat dilihat dalam Gambar 7.

```

EigenSolve: Computed 3 Eigen Values
EigenSolve: -----
EigenSolve: 1: 1.468494E+07 0.000000E+00
EigenSolve: 2: 5.860065E+08 0.000000E+00
EigenSolve: 3: 6.114739E+08 0.000000E+00
EigenSolve: -----
StressSolver: All done
StressSolver: -----

```

Gambar 7. Hasil EigenSolve pada jendela Solver Log

Berdasarkan hasil simulasi dalam Gambar 7. diperoleh tiga nilai *EigenSolve* yaitu *EigenSolve 1*, *EigenSolve2* dan *EigenSolve3*. Dikarenakan frekuensi yang dipakai dalam simulasi adalah frekuensi ke-1 maka *EigenSolve* yang dipakai yaitu *EigenSolve1* (Penentuan nilai *eigen solve* ini berdasarkan bentuk perubahan displacement yang dihasilkan pada simulasi mengacu pada Gambar 3). Nilai *Eigen* bukanlah nilai frekuensi yang sesungguhnya sehingga nilai eigensolve ini perlu dikonversi menjadi nilai frekuensi yang sesungguhnya. Secara teori nilai $Eigen = w^2$, dimana w adalah nilai frekuensi dalam bentuk rad/s. Sehingga :

$$w = \sqrt{Eigen\ value}$$

$$w = \sqrt{1,468494 \times 10^7}$$

$$w = 3,832 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{3,832 \times 10^6}{2\pi}$$

$$f = 6,1 \times 10^5 \text{ Hz}$$

$$f = 0,61 \text{ MHz}$$

Jadi, dari simulasi elmer didapatkan nilai frekuensi sebesar 0,61 MHz untuk ketebalan mikrokantilever 1,5 μm . Perbandingan nilai frekuensi yang dihasilkan oleh mikrokantilever ketika ketebalan diubah sebesar 0,75 μm ; dan 3 μm dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Frekuensi Mikroantiliver

Ketebalan	Frekuensi
0,75 μm	0,31 MHz
1,5 μm	0,61 MHz
3 μm	1,218 MHz

Berdasarkan hasil pengamatan dari simulasi frekuensi dengan mengubah ketebalan dari dimensi kantiliver yaitu 0,75 μm dan 3 μm , bahwa nilai dari ketebalan mikroantiliver berpengaruh terhadap besarnya frekuensi yang dihasilkan oleh mikrokantilever. Semakin besar nilai ketebalan dari mikrokantilever maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin besar pula. Mikrokantilever dengan ketebalan 0,75 μm menghasilkan frekuensi sebesar 0,31 MHz, ketebalan 1,5 μm menghasilkan frekuensi 0,61 dan ketebalan 3 μm menghasilkan frekuensi sebesar 1,218 MHz.

5. KESIMPULAN

Besarnya displacement pada mikrokantilever berbanding lurus dengan perubahan force yang diberikan. Dimana apabila force yang diberikan semakin besar maka nilai dari displacement yang dihasilkan oleh mikrokantilever akan semakin besar pula. Nilai displacement yang dihasilkan pada mikrokantilever adalah 5,31 x 10-10 mm jika menggunakan force sebesar 4N, 6,64 x 10-10 mm jika menggunakan force sebesar 5N dan 7,97 x 10-10 mm jika menggunakan force sebesar 6N.

Ketebalan pada saat perancangan mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh mikrokantilever. Pada simulasi menggunakan tiga ketebalan berbeda menghasilkan frekuensi yang berbeda pula. Dimana semakin tebal mikrokantiliver maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin besar. Ketebalan 0,75 μm menghasilkan frekuensi sebesar 0,31 MHz, ketebalan 1,5 μm menghasilkan frekuensi sebesar 0,61 MHz dan ketebalan 3 μm menghasilkan frekuensi 1,218 MHz.

UCAPAN TRIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Teknik Elektro dan LPPM Universitas Wisnuwardhana yang telah mendukung Penelitian ini. Sehingga, Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

REFERENSI

- [1] Blachowicz T, Ehrmann A. 3D printed MEMS technology-recent developments and applications. *Micromachines* 2020;11:1–14. <https://doi.org/10.3390/MI11040434>.
- [2] Algamili AS, Khir MHM, Dennis JO, Ahmed AY, Alabsi SS, Ba Hashwan SS, et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Res Lett* 2021;16. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>.
- [3] Mezghani B, Tounsi F, Rekik AA, Maily F, Masmoudi M, Nouet P. Sensitivity and power modeling of CMOS mems single axis convective accelerometers. vol. 44. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2013.06.006>.
- [4] Nadim Maluf. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. *Meas Sci Technol* 2002;13:229. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/2/701>.
- [5] Kahn H, Tayebi N, Ballarini R, Mullen RL, Heuer AH. Fracture toughness of polysilicon MEMS devices. *Sensors Actuators, A Phys* 2000;82:274–80. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00366-0](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00366-0).
- [6] Tian Y, Liu Y, Wang Y, Xu J, Yu X. A flexible pi/si/sio2 piezoresistive microcantilever for trace-level detection of aflatoxin b1†. *Sensors (Switzerland)* 2021;21:1–16. <https://doi.org/10.3390/s21041118>.
- [7] Widodo S, Kristiantoro T. Teknologi Micro Electro Mechanical Systems. *Pros Semin Nas ...* 2014;321–33.
- [8] Dadang. Keutamaan MEMS dalam Elektronika Ukuran Mikro 2015. <https://www.its.ac.id/news/2015/10/05/keutamaan-mems-dalam-elektronika-ukuran-mikro/> (accessed June 5, 2022).
- [9] Ma LY, Soin N, Daut MHM, Hatta SFWM. Comprehensive Study on RF-MEMS Switches Used for 5G Scenario. *IEEE Access* 2019;7:107506–22. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932800>.
- [10] Tian Y, Zhao R, Liu Y, Yu X. A low spring constant piezoresistive microcantilever for biological reagent detection. *Micromachines* 2020;11:1–13. <https://doi.org/10.3390/mi11111001>.
- [11] Febriansyah A. Piezoresistive microcantilever sensor. *Semin. Nas. Sains dan Teknol.* 2014, 2015, p. 1–5.
- [12] Liu Y, Tian Y, Lin C, Miao J, Yu X. A monolithically integrated microcantilever biosensor based on partially depleted SOI CMOS technology. *Microsystems Nanoeng* 2023;9. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00534-y>.
- [13] Arora S, Sumati, Arora A, George PJ. Design of mems based microcantilever using comsol multiphysics. *Int J Appl Eng Res* 2012;7:1582–4.
- [14] Anonim. Hooke's Law n.d. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/permot2.html#:~:text=Go Back-,Hooke%27s Law,force is called Hooke%27s law.> (accessed January 3, 2024).
- [15] Ansys. Module 10 : Free Vibration of an Undampened 1D Cantilever Beam 2010:1–15.
- [16] Anonim. Free Vibration of a Cantilever Beam (Continuous System) 2011. <https://vlab.amrita.edu/?sub=3&brch=175&sim=1080&cnt=1> (accessed July 6, 2022).