

## Investigasi Pengaruh Daya RF terhadap Morfologi Silicon Nanowire berbantuan Katalis Nikel pada Penumbuhan dengan Metode PECVD

Aulia Fikri Hidayat<sup>1</sup>✉ dan Toto Winata<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Bandung, Jl. Ranggagading No. 8, Bandung, 40116, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung, 40132, Indonesia

### Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima:  
12 April 2019

Disetujui:  
23 Mei 2019

Dipublikasikan:  
11 Juli 2019

*Keywords:*  
Daya RF; morfologi;  
nikel; PECVD; silicon  
nanowire.

### ABSTRAK

*Silicon nanowire (SiNW)* merupakan material berstruktur nano yang pemanfaatannya cukup luas, diantaranya yaitu sebagai material divais elektronik, sebagai material biosensor, dan sebagai sistem pembawa obat. Penumbuhan SiNW salah satunya dapat dilakukan dengan metode PECVD (*plasma-enhanced chemical vapor deposition*). Nikel digunakan sebagai katalis dalam penumbuhan SiNW pada penelitian ini. Lapisan tipis nikel diberi perlakuan annealing pada suhu 600°C selama 6 jam untuk memperoleh butiran nikel sebagai pemandu tumbuhnya nanowire. Penumbuhan SiNW dilakukan dengan metode PECVD dengan memvariasikan daya frekuensi radio (RF) reaktor sebesar 8 watt, 10 watt, dan 20 watt. Diameter rata-rata untuk daya 8 watt, 10 watt, dan 20 watt berturut-turut adalah 1143,17 nm; 1490,27 nm; dan 2605,26 nm. Morfologi permukaan dilihat dengan pencitraan *scanning electron microscope* (SEM). Rasio aspek wire dengan daya RF penumbuhan 8 watt, 10 watt, dan 20 watt diinvestigasi dengan pencitraan SEM penampang lintang dengan hasil berturut-turut sebesar 23,3; 3,13; dan 0,33.

### ABSTRACT

*Silicon nanowire (SiNW)* is a nanostructured material with broad applications including as electronic device materials, biosensor materials, and drug delivery system. One of many techniques that can be employed to synthesize SiNW is PECVD (*plasma-enhanced chemical vapor deposition*) method. Nickel was used as catalyst in this research. Nickel thin film was annealed at 600°C for 6 hours to obtain nickel granules as a guide for nanowire growth. SiNW synthesis was performed using PECVD method with the variation of radio frequency (RF) power at 8 watt, 10 watt, and 20 watt. Average diameters for 8 watt, 10 watt, and 20 watt growth are 1143.17 nm, 1490.27 nm, and 2605.26 nm respectively. Surface morphology profile was showed by scanning electron microscope (SEM) image. Aspect ratio of the wire at 8 watt, 10 watt, and 20 watt investigated using cross-section SEM image showed result of 23.3, 3.13, and 0.33 respectively.

## PENDAHULUAN

*Silicon nanowire* (SiNW) merupakan material berstruktur nano berbasis silikon yang memiliki potensi aplikasi yang bervariasi. Struktur satu dimensi dari *nanowire* meningkatkan efisiensi transport elektron dan eksitasi optik sehingga dapat digunakan sebagai kanal pada transistor efek medan (Wanekaya dkk, 2006). Peran SiNW juga dapat ditemukan dalam pengembangan biosensor untuk mendiagnosis keberadaan sel kanker payudara serta responnya terhadap obat antikanker (Shashaani dkk, 2016). SiNW berpotensi pula dalam sistem pembawa obat, dimana obat doxorubicin yang dibawa SiNW menurunkan viabilitas sel kanker hingga mencapai ~10%, jauh lebih baik dibandingkan dengan doxorubicin biasa yang hanya ~40% (Peng dkk, 2014). Meskipun demikian, pemanfaatan SiNW secara lebih luas masih terkendala biaya fabrikasinya yang cukup tinggi. Untuk mereduksi biaya fabrikasi SiNW beberapa alternatif dapat diambil, misalnya dengan menumbuhkannya di substrat berbiaya rendah seperti kaca atau plastik dimana dapat digunakan temperatur penumbuhan yang lebih rendah. Penggunaan temperatur rendah memiliki keunggulan lebih rendahnya kemungkinan kerusakan struktur (Cervenka dkk, 2010). Alternatif berikutnya yaitu menggunakan atau memodifikasi sistem yang dapat menghasilkan laju penumbuhan yang cukup tinggi sehingga diperlukan waktu penumbuhan yang lebih rendah. Salah satu metode penumbuhan SiNW yang dianggap cukup fleksibel dari segi penggunaan temperatur dan kemudahan modifikasi sistem yaitu PECVD (*plasma-enhanced chemical vapor deposition*), yang merupakan variasi dari metode CVD (*chemical vapor deposition*).

Pada penumbuhan material berbasis silikon menggunakan metode PECVD, pembangkitan plasma terjadi akibat tumbukan gas reaktan berupa silan ( $\text{SiH}_4$ ) dengan elektron yang diakselerasi oleh medan listrik di antara elektroda di dalam reaktor. Reaksi yang terjadi memunculkan spesies-spesies  $\text{SiH}_x$  ( $x = 1,2,3$ ) dalam plasma yang merupakan hasil dekomposisi akibat disosiasi dan ionisasi silan. Spesies-spesies tersebut kemudian terendapkan (terdeposisi) ke atas substrat melalui proses difusi. Pembangkit daya frekuensi radio (RF) digunakan untuk menghasilkan medan listrik tersebut. Pada sistem PECVD konvensional pembangkit daya menggunakan frekuensi radio 13,56 MHz. Namun demikian, penggunaan frekuensi tersebut untuk penumbuhan sel surya berbasis silikon mengindikasikan struktur dengan homogenitas dan performa yang lebih rendah dibandingkan penggunaan frekuensi sangat tinggi 70 MHz (Jones dkk, 2000). Pada besaran daya yang sama, penggunaan frekuensi 70 MHz menghasilkan laju penumbuhan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan struktur yang lebih baik dibandingkan penggunaan frekuensi 13,56 MHz. Hal ini berhubungan dengan kurungan (*sheath*) plasma di atas substrat yang lebih tipis dengan penggunaan frekuensi tersebut (Howling dkk, 1992). Laju penumbuhan tinggi yang dihasilkan oleh frekuensi sangat tinggi juga meningkatkan bombardir ion pada lapisan silikon di atas substrat, yang berpotensi menyebabkan timbulnya cacat struktur saat penumbuhan (Shah, 2012). Salah satu alternatif yang digunakan untuk mereduksi bombardir ion pada metode PECVD konvensional yaitu dengan menambahkan filamen pemanas (*hot-wire*) untuk membantu dekomposisi silan. Dengan adanya filamen pemanas proses dekomposisi silan akan terjadi sebagian pada filamen, alih-alih pada plasma seluruhnya (Matsumura dkk, 2004).

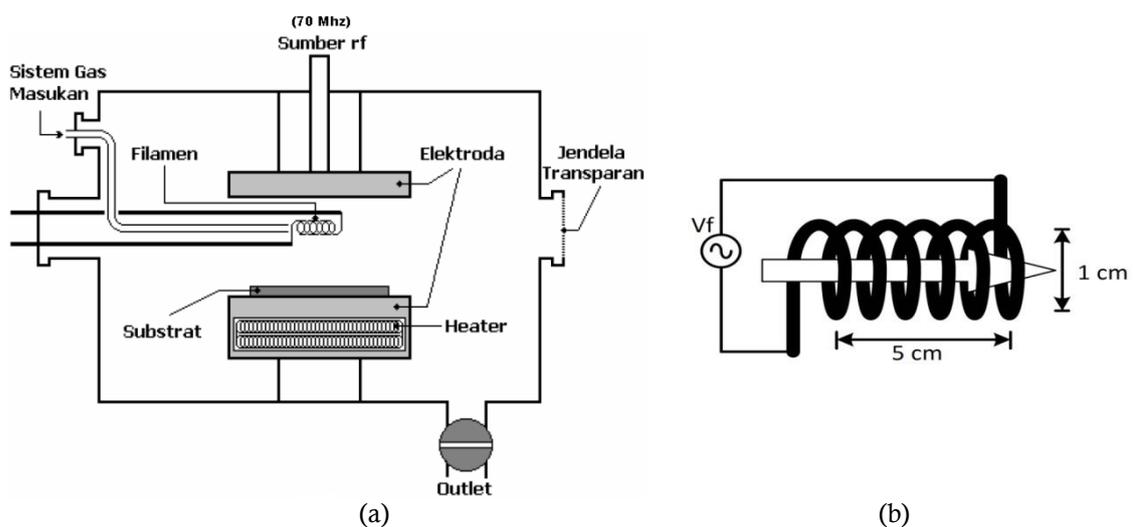
Pada penumbuhan SiNW dengan metode PECVD diperlukan substrat yang telah ditumbuhi butiran-butiran katalis logam di atasnya. Posisi butiran-butiran katalis akan menjadi pemandu posisi tumbuhnya struktur silikon satu dimensi. Beberapa jenis logam yang dapat berperan dalam penumbuhan SiNW diantaranya yaitu emas (Hofmann dkk, 2003), timah, dan indium (Yu dkk, 2009). Pada penelitian ini digunakan logam nikel sebagai alternatif katalis penumbuhan SiNW. Dengan kombinasi sistem PECVD berpembangkit daya frekuensi sangat tinggi (*very high frequency*) dan filamen pemanas (*hot wire*) yang digunakan dalam penelitian ini diharapkan dapat dilakukan penumbuhan SiNW pada temperatur yang relatif lebih rendah (300–700 °C) dibandingkan metode konvensional (lebih dari 1000 °C). Dengan temperatur yang rendah, daya RF merupakan parameter

yang krusial dalam penumbuhan SiNW. Peningkatan daya RF diharapkan meningkatkan disosiasi gas silan sehingga meningkatkan laju penumbuhan (Chong dkk, 2011). Namun demikian, peningkatan daya RF juga berimplikasi pada deaktivasi peran katalis selama penumbuhan sehingga lapisan silikon juga ikut tumbuh di tempat tak berkatalis (Hofmann dkk, 2003) dan menghasilkan kerapatan struktur yang rendah (Gusev dkk, 2017). Karena itu pada penelitian ini dilakukan optimasi parameter daya RF yang digunakan selama proses penumbuhan sehingga dihasilkan SiNW yang tumbuh secara vertikal alih-alih melebar, dengan homogenitas ukuran yang tinggi.

## METODE

Eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap. Tahap preparasi dilakukan dengan pencucian substrat berupa kaca preparat secara ultrasonikasi di dalam aseton, metanol, dan air deionisasi secara bergantian masing-masing selama 5 menit, yang dilanjutkan dengan penyemprotan menggunakan nitrogen kering. Tahap berikutnya yaitu penumbuhan lapisan tipis nikel di atas substrat yang telah dicuci. Penumbuhan lapisan tipis nikel dilakukan dengan menguapkan 10,3 mg pelet nikel ke atas substrat dalam evaporator. Selanjutnya pada lapisan tipis nikel tersebut dilakukan annealing di lingkungan nitrogen pada suhu 600 °C selama 6 jam sehingga terbentuk butiran-butiran katalis nikel di atas substrat.

Tahap selanjutnya yaitu penumbuhan SiNW di atas substrat berkatalis nikel dengan metode PECVD. Reaktor PECVD yang digunakan tersusun atas dua elektroda sejajar yang berada dalam ruang berbahan baja nirkarat (*stainless steel*) (Gambar. 1a). Elektroda atas tersambung ke pembangkit daya yang dioperasikan pada frekuensi radio (RF) sangat tinggi (*very high frequency*, VHF) sebesar 70 MHz. Sedangkan elektroda bawah sekaligus berperan sebagai tempat substrat. Posisi saluran gas masukan berada di tengah ruang dan sejajar elektroda. Filamen pemanas (*hot wire*) berbahan tungsten yang digunakan pada konfigurasi ini memiliki panjang 5 cm dan diameter 1 cm (Gambar. 1b) serta diposisikan secara horizontal di antara kedua elektroda. Filamen pemanas diberi pasokan daya secara langsung dengan besar yang konstan selama proses penumbuhan berlangsung. Penumbuhan dilakukan dengan mengalirkan gas reaktan berupa SiH<sub>4</sub> (silan) sebagai prekursor silikon selama 1 jam, laju aliran gas 70 sccm, dan tekanan 400 mTorr. Temperatur substrat yang digunakan sebesar 380 °C dan temperatur filamen pemanas 500 °C. Optimasi parameter daya RF dilakukan dengan memvariasikan besar daya 8 watt, 10 watt, dan 20 watt.



Gambar 1. (a) Konfigurasi reaktor PECVD yang digunakan di dalam penelitian (Usman, 2006) dan (b) skema filamen pemanas (*hot wire cell*) (Supu, 2005)

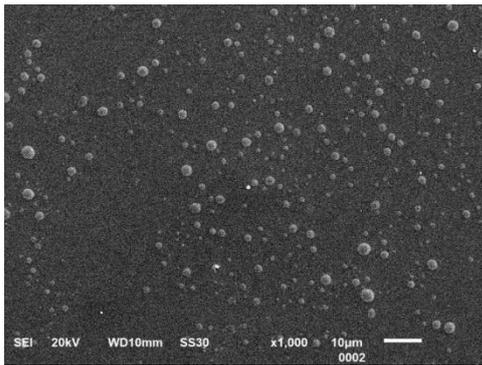
Karakterisasi morfologi dan rasio aspek kemudian dilakukan melalui pencitraan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) JEOL JSM-6510LA. Hasil citra SEM diolah sehingga diperoleh profil histogram dan kurva distribusi. Diameter tiap-tiap butiran partikel pada citra SEM diukur dalam skala pixel kemudian dikonversi ke dalam skala nanometer dengan memanfaatkan garis skala pada citra SEM. Pengelompokkan ukuran butiran dan representasinya dalam histogram dibuat menggunakan software MATLAB dengan distribusinya berupa distribusi normal serta ditampilkan informasi ukuran rata-rata ( $\mu$ ) dan simpangan baku ( $\sigma$ ). Hasil citra SEM penampang lintang dimanfaatkan untuk memperoleh profil rasio aspek struktur. Ukuran vertikal dan ukuran horizontal dalam skala pixel dikonversi ke dalam skala nanometer, dimana hasil bagi antar keduanya merupakan nilai rasio aspek struktur.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

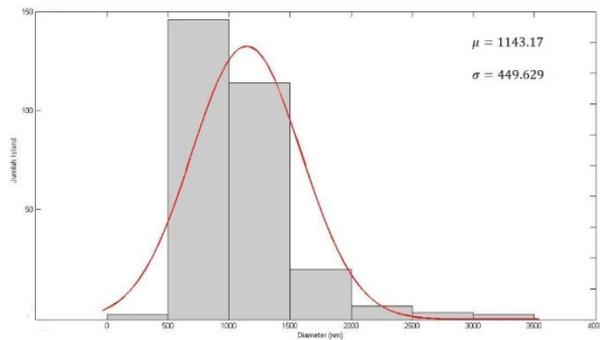
Morfologi struktur SiNW yang ditumbuhkan dengan daya RF 8 watt, 10 watt dan 20 watt ditunjukkan pada gambar 2a-2c. Citra visual SEM pada area yang luas memperlihatkan bahwa jumlah titik yang diduga SiNW dengan daya RF 8 watt dan 10 watt cenderung lebih banyak, serta memiliki ukuran yang cenderung lebih homogen dibandingkan dengan daya RF 20 watt.

Citra SEM tersebut kemudian dimanfaatkan untuk membuat profil histogram serta kurva distribusinya pada beberapa rentang nilai diameter (Gambar 2d-2f). Berdasarkan histogram dan kurva distribusi terlihat bahwa penumbuhan SiNW dengan daya RF 8 watt, 10 watt, dan 20 watt menghasilkan diameter rata-rata butiran ( $\mu$ ) berturut-turut 1143,17 nm, 1490,27 nm, dan 2605,26 nm. Dengan nilai simpangan baku ( $\sigma$ ) berturut-turut 449,63; 595,79; dan 1128,91. Nilai simpangan baku yang semakin besar menunjukkan homogenitas ukuran partikel yang semakin rendah.

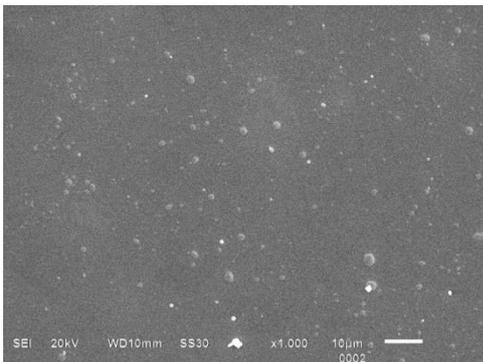
Citra SEM penampang lintang pada Gambar 3 mendeskripsikan profil rasio aspek SiNW yang diambil pada titik tertentu dari masing-masing parameter daya RF. Nilai rasio aspek kemudian diperoleh dengan membandingkan panjang dengan diameter *wire* yang terbentuk pada lokasi tersebut. SiNW dengan daya RF 8 watt (Gambar 3a) menunjukkan adanya struktur vertikal melengkung dengan diameter sekitar 600 nm dan panjang mencapai 14.000 nm. Rasio aspek struktur tersebut mencapai 23,33. Hasil tersebut paling tinggi jika dibandingkan dengan sampel dengan daya RF 10 watt dan 20 watt. Nilai aspek rasio ini mendekati hasil dari beberapa penelitian. Smyrnakis, dkk (2015) menggunakan metode etsa plasma silikon kriogenik untuk memperoleh SiNW dengan aspek rasio 37,0. Pada penelitian lain, Feng, dkk (2018) menghasilkan SiNW dengan aspek rasio optimal 30,0 dengan metode yang hampir serupa. Lebih jauh, berkorelasi dengan penelitian ini, penelitian oleh Park, dkk (2016) menghasilkan temuan bahwa pelengkungan struktur berhubungan dengan panjang dan diameter *wire*. Dengan memanfaatkan gaya lateral yang diberikan dari instrumen *atomic force microscope* (AFM), didapatkan korelasi bahwa semakin panjang *wire* yang terbentuk, maka semakin mudah *wire* akan melengkung. Sedangkan diameter yang lebih besar menyebabkan pelengkungan yang lebih sulit.



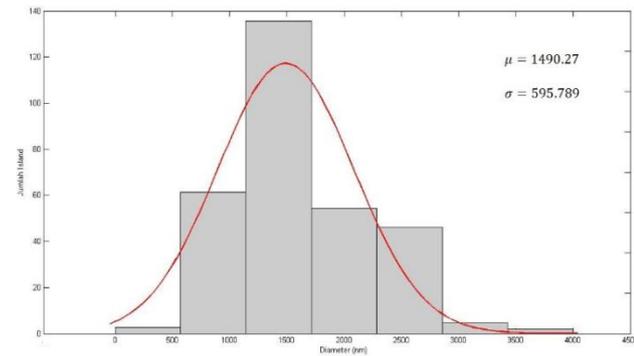
(a)



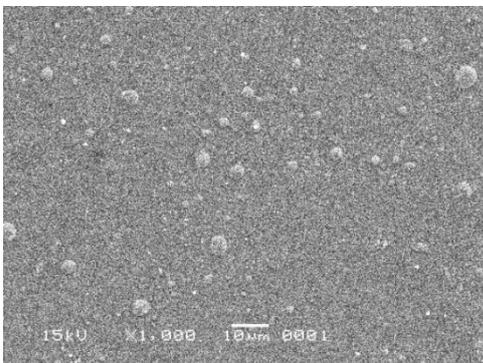
(d)



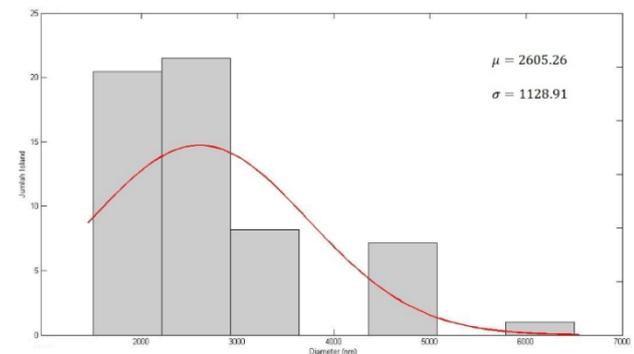
(b)



(e)



(c)

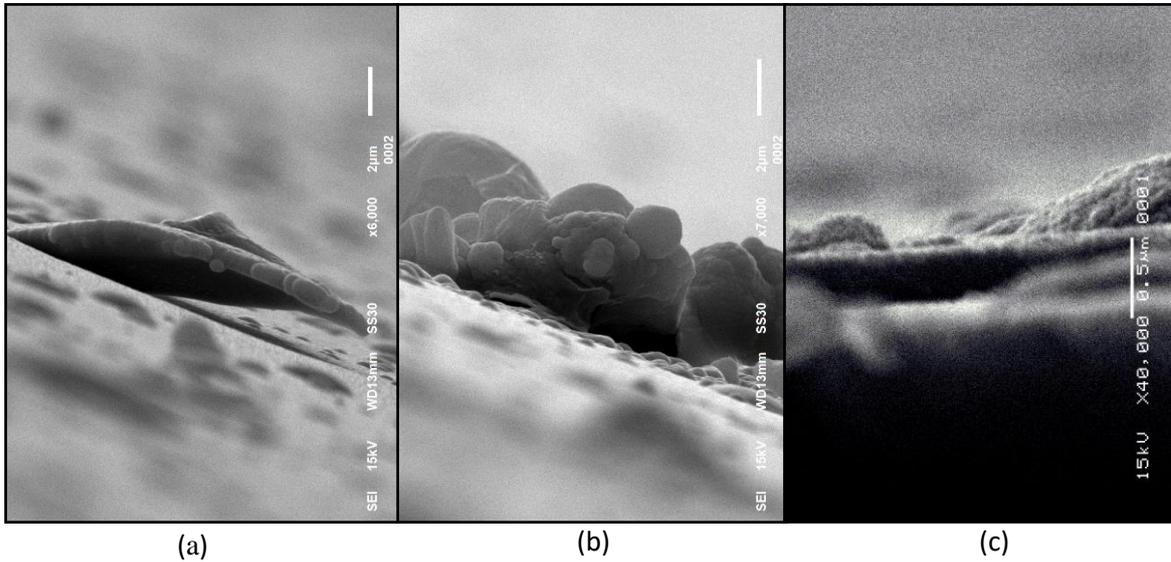


(f)

Gambar 2. Citra SEM SiNW dengan daya RF (a) 8 watt, (b) 10 watt, dan (c) 20 watt serta histogram-kurva distribusi SiNW dengan daya RF (d) 8 watt, (e) 10 watt, dan (f) 20 watt.

Pada daya RF 10 watt (Gambar 3b), struktur yang terbentuk memiliki diameter sekitar 800 nm dan panjang sekitar 2500 nm, sehingga menghasilkan nilai rasio aspek sekitar 3,13. Rasio aspek yang bernilai lebih dari 1 mengindikasikan adanya penumbuhan vertikal. Namun demikian, ketiadaan informasi yang seragam mengenai rentang nilai rasio aspek *nanowire*, struktur ini cukup ambigu jika disebut *nanowire*. Informasi mengenai rasio aspek *nanowire* yang rendah ditemukan dalam penelitian oleh Das, dkk (2008) yang merekayasa rasio aspek *nanowire* nikel dan mengkaji pengaruhnya terhadap karakteristik magnetik *nanowire* yang terbentuk. *Nanowire* nikel yang divariasikan memiliki rasio aspek terendah sekitar 3,5. Pada penumbuhan dengan daya RF 20 watt,

indikasi penumbuhan struktur secara vertikal belum terlihat. Struktur yang terbentuk masih berupa butiran dengan dimensi vertikal 166,67 nm dan diameter sekitar 500 nm, menghasilkan rasio aspek yang rendah yaitu 0,33.



Gambar 3. Citra SEM penampang lintang SiNW dengan daya RF penumbuhan (a) 8 watt, (b) 10 watt, (c) 20 watt.

Peningkatan daya RF yang berimplikasi pada semakin besarnya diameter rata-rata berkorelasi dengan rendahnya nilai rasio aspek struktur yang terbentuk. Hal ini terutama terjadi akibat penumbuhan ke samping yang lebih mendominasi dibandingkan penumbuhan ke atas. Daya RF yang semakin tinggi menyebabkan kenaikan bombardir ion dan disosiasi gas silan. Dalam kurungan plasma (*plasma sheath*), substrat dibombardir oleh spesies-spesies ionik dengan energi yang tinggi. Energi ion yang membombardir substrat ini sebanding dengan tegangan pada kurungan plasma ( $V$ ) dan tekanan gas masukan ( $P$ ), yang dapat dinyatakan seperti Persamaan (1).

$$E_{ion} \propto V^{4/5} P^{-1/2} \quad (1)$$

Selama proses penumbuhan di dalam reaktor PECVD, laju aliran gas dan tekanan gas masukan dijaga konstan. Sehingga berdasarkan kesebandingan tersebut, variabel utama yang dapat meningkatkan energi kinetik ion yang membombardir permukaan substrat adalah daya RF, yang sebanding dengan besarnya tegangan (Chong dkk, 2011). Hal ini memiliki konsekuensi berupa peningkatan energi kinetik ion yang menumbuk butiran katalis, menyebabkan pemecahan butiran katalis menjadi banyak butiran-butiran yang lebih kecil. Spesies-spesies  $\text{SiH}_x$  yang energetik akan berdifusi ke dalam butiran-butiran kecil tersebut, mengalami saturasi lebih cepat, dan memicu tumbuhnya *nanowire*. Namun, dengan peningkatan daya RF kurungan plasma di atas substrat juga menebal, menyebabkan orientasi penumbuhan vertikal tertahan, sehingga orientasi penumbuhan cenderung ke samping yang menyebabkan diameter struktur lebih besar. Peningkatan daya RF juga memicu deaktivasi butiran katalis, dimana butiran katalis nikel justru tertutupi oleh spesies-spesies hasil dekomposisi silan yang terendapkan sebagai lapisan alih-alih sebagai “tumpukan” (Hofmann dkk, 2003). Implikasinya yaitu terjadi penumbuhan yang tidak merata dan ukuran yang kurang homogen akibat hilangnya fungsi katalis nikel sebagai pemandu.

## SIMPULAN

Penumbuhan SiNW berkatalis nikel dilakukan menggunakan metode PECVD dengan memvariasikan daya RF sebesar 8 watt, 10 watt, dan 20 watt. Karakterisasi morfologi dengan citra SEM menunjukkan bahwa diameter rata-rata terkecil yaitu 1143,17 nm diperoleh pada daya RF 8 watt. Sedangkan daya 20 watt menghasilkan diameter rata-rata terbesar yaitu 2605,26 nm. Dari nilai simpangan baku diperoleh pula informasi bahwa homogenitas struktur dengan daya RF 8 watt yang paling baik dibandingkan dengan daya 10 watt dan 20 watt. Selaras dengan itu, citra SEM penampang lintang untuk daya RF 8 watt dengan nilai rasio aspek sebesar 23,3 dikatakan paling baik, karena jauh lebih tinggi dibandingkan nilai rasio aspek struktur yang ditumbuhkan dengan daya RF 10 watt dan 20 watt.

## REFERENSI

- Cervenka, J., Ledinsky, M., Stuchlik, J., Stuchlikova, H., Bakardjieva, S., Hruska, K., Fejfar, A., & Kocka, J. (2010). The structure and growth mechanism of nanoneedles prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Nanotechnology*. 21: 1-7
- Chong, S.K., Goh, B.T., Aspanut, Z., Muhamad, M.R., Dee, C.F., & Rahman, S.A. (2011). Effect of rf power on the growth of silicon nanowires by hot-wire assisted plasma enhanced chemical vapor deposition (HW-PECVD) technique. *Thin Solid Films*. 519: 4933-4939
- Das, B., Mandal, K., Sen, P., & Bandopadhyay, S.K. (2008). Effect of aspect ratio on the magnetic properties of nickel nanowires. *J. Appl. Phys.* 103: 1-5
- Feng, B., Deng, J., Lu, B., Xu, C., Wang, Y., Wan, J., & Chen, Y. (2018). Nanofabrication of silicon nanowires with high aspect ratio for photo-electron sensing. *Microelectronic Engineering*. 195: 139-144
- Gusev, E.Y., Jityaeva, J.Y., Geldash, A. A., dan Ageev, O.A. (2017). Effects of PECVD temperature and RF power on surface structure and refractive index of amorphous and polycrystalline silicon films. *Journal of Physics: Conf. Series*. 917: 1-4
- Hofmann, S., Ducati, C., Neill, R.J., Piscanec, S., Ferrari, A.C., Geng, J., Dunin-Borkowski, R.E., dan Robertson, J. (2003). Gold catalyzed growth of silicon nanowires by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*. 94 (9): 6005-6012
- Howling, A.A., Dorier, J., Hollenstein, Ch., Kroll, U., dan Finger, F. (1992). Frequency effects in silane plasmas for plasma enhanced chemical vapor deposition. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 10(4): 1080-1085
- Jones, S.J., Williamson, D.L., Liu, T., Deng, X., dan Izu, M. (2000). Comparison of Structural Properties and Solar Cell Performance of a Si:H Films Prepared at Various Deposition Rates using 13.56 and 70 MHz PECVD Methods. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 609: 1-7
- Matsumura, H., Umemoto, H., dan Masuda, A. (2004). Cat-CVD (hot-wire CVD): how different from PECVD in preparing amorphous silicon. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 338-340: 19-26
- Park, Y., Yoon, S., Park, J., & Lee, J. (2016). Deflection induced cellular focal adhesion and anisotropic growth on vertically aligned silicon nanowires with differing elasticity. *NPG Asia Materials*. 8: 1-8
- Peng, F., Su, Y., Ji, X., Zhong, Y., Wei, X., & He, Y. (2014). Doxorubicin-loaded silicon nanowires for the treatment of drug-resistant cancer cells. *Biomaterials*. 35: 5188-5195
- Shah, A. Thin-film silicon solar cells. In: McEvoy (Ed). (2012). *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*. Cambridge: Academic Press
- Shao, M.W., Mao, D.D.D., & Lee, S.T. (2010). Silicon nanowires – synthesis, properties, and applications. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 4264-4278

- Shashaani, H., Faramarzpour, M., Hassanpour, M., Namdar, N., Alikhani, A., & Abdolahad, M. (2016). Silicon nanowire based biosensing platform for electrochemical sensing of mebendazole drug activity on breast cancer cells. *Biosensors and Bioelectronics*. 1-8
- Smyrnakis, A., Almpanis, E., Constantoudis, V., Papanikolaou, N., & Gogolides, E. (2015). Optical properties of high aspect ratio plasma etched silicon nanowires: fabrication-induced variability dramatically reduces reflectance. *Nanotechnology*. 26(8): 1-12
- Supu, A. (2005). Penumbuhan lapisan tipis a-Si:H,  $\mu$ c-Si:H dan poly-Si dengan metode hot wire cell CVD untuk divais elektronik dan optoelektronik. *Disertasi*. Bandung: Sekolah Pascasarjana Institut Teknologi Bandung
- Usman, I. (2006). Penumbuhan lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi dengan teknik hwc-vhf-pecvd dan aplikasinya pada divais sel surya. *Disertasi*. Bandung: Sekolah Pascasarjana Institut Teknologi Bandung
- Wanekaya, A.K., Chen, W., Myung, N.V., & Mulchandani, A. (2006). Nanowire-based electrochemical biosensors. *Electroanalysis*. 18(6): 533-550
- Yu, L., O'Donnell, B., Alet, P., Conesa-Boj, S., Peiro, F., Arbiol, J., dan Cabarrocas, P. R. (2009). Plasma-enhanced low temperature growth of silicon nanowires and hierarchical structures by using tin and indium catalysts. *Nanotechnology*. 20: 1-5.