

KAJIAN BERANGKA BENDALIR LAMINAR DI DALAM SESALUR MIKRO BERTIANG BAGI APLIKASI PERANTI BIOMEDIKAL

Wan Ammar Fikri Wan Ali¹, Jumril Yunas², Azrul Azlan Hamzah³,
Burhanuddin Yeop Majlis⁴

Institute of Microengineering & Nanoelectronics (IMEN)
Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)
43600 Bangi, Selangor, Malaysia
Email : jumrilyunas@ukm.edu.my

ABSTRAK

Kajian simulasi telah dijalankan untuk menganalisa profil dan indeks campuran bagi aliran bendalir laminar dalam tiga saluran mikro bertiang iaitu saluran mikro bertiang prisma (SPr), saluran mikro bertiang silinder (SSi) dan saluran mikro bertiang petak (SPe). Nisbah lebar tiang mikro dengan lebar saluran ialah 1 : 2. Lebar saluran mikro ialah 100 μ m manakala jumlah panjang bagi pencampur mikro ialah 1900 μ m. Hasil analisa menunjukkan SPr dan SPe mempunyai indeks prestasi yang lebih baik dengan peningkatan nombor *Reynolds* (Re) berbanding SSi. Pada kadar Re diantara 10<Re<40, indeks campuran bagi SSi berkadar songsang tetapi apabila nilai Re ditingkatkan melebihi 50, barulah indeks SSi berkadar langsung dengan Re. Tiga jenis tiang yang dipilih mempunyai bentuk yang tidak kompleks bagi memudahkan mengkaji kesan struktur permukaan kepada aliran laminar dalam proses pencampuran. Kajian simulasi ini mampu memberikan kefahaman yang lebih baik bagi mereka bentuk pencampur mikro yang pasif yang melibatkan saluran bertiang.

Kata Kunci: *Microfluidics*, aliran laminar, saluran mikro bertiang, nombor *Reynolds*.

1. Pengenalan

Kebelakangan ini, teknologi *microfluidics* telah menjadi satu tarikan kajian dalam kalangan para penyelidik. Sistem saluran mikro telah digunapakai bagi mengkaji peredaran darah, lekatan sel dan pengangkutan molekul dan membolehkan ujian diagnostik[1]. Sistemnya yang cepat dan mampu dikawal dalam proses pencampuran membuatnya penting dalam aplikasi *lab-on-chip* dan juga proses reaksi biokimia [2][3]. Terdapat kajian saluran mikro yang dijalankan bertujuan menyesuaikan peranti mikro bagi menggantikan sistem organ tubuh badan manusia [1]. Antara mekanisma yang terdapat di dalam sistem saluran mikro ialah kaedah pemisahan dan juga pencampuran molekul. Kaedah pemisahan penting dalam bidang biomedikal terutamanya yang melibatkan sampel heterogen yang memerlukan peranti pemisahan yang mudah dan berkesan di mana ianya sukar dicapai menggunakan kaedah pemisahan tradisional [4]. Kaedah pencampuran

selalunya digunapakai di dalam sistem penyampaian ubat, pengesanan bakteria dan penjujukan DNA. Kaedah ini juga memerlukan proses yang pantas dalam menghasilkan larutan yang homogen [5].

Peranti mikro mempunyai kelebihan dalam sistem penyampaian ubat bagi menghantar ubat daripada takungan simpanan ke dalam tubuh badan dalam julat terapi secara tepat, jitu dan berkesan. Kadar ubat yang melebihi atau kurang daripada julat terapi akan mengurangkan keberkesanan ubat dan boleh membahayakan kesihatan [6]. Bagi mencapai aliran bahan yang tepat dan jitu, peranti hendaklah beroperasi di dalam saiz yang kecil [7]. Walau bagaimanapun, pengecilan saluran dan kebuk reaksi telah menimbulkan masalah dalam proses pencampuran disebabkan bahan yang mengalir secara laminar [8]. Aliran laminar tidak mampu mencetuskan pencampuran melintang antara bendalir disebabkan sifat alirannya yang lancar dan malar berbanding aliran bergolak yang terdiri daripada aliran berpusar [8]. Nilai Re bagi aliran laminar selalunya berada di bawah 2000 sementara nilai aliran bergolak melebihi 2000. Re ditakrifkan seperti persamaan berikut:

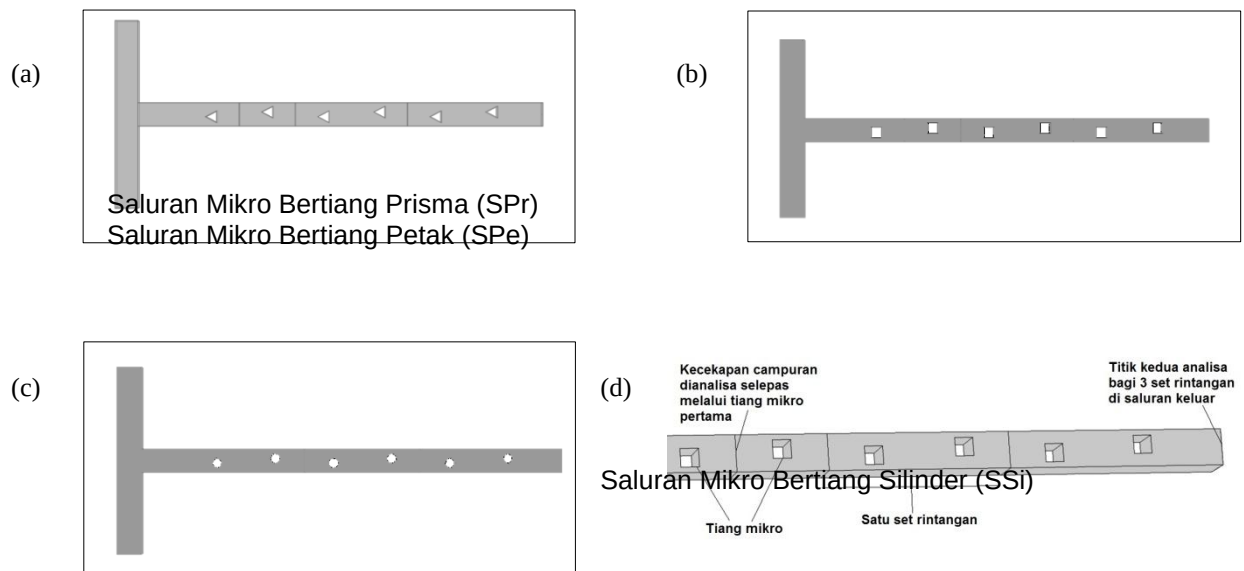
$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

di mana ρ adalah ketumpatan bendalir, v adalah halaju bendalir, d adalah diameter hidraulik dan μ adalah kelikatan dinamik bendalir.

Aliran laminar tidak mampu menghasilkan pergolakan pencampuran sisi antara bendalir dan hanya bergantung kepada resapan molekul yang mengambil masa yang lama dan saluran yang panjang bagi mencapai campuran yang sekata. Pencampuran pasif dan pencampuran aktif boleh diguna pakai untuk meningkatkan prestasi campuran. Pencampuran aktif melibatkan daya luaran manakala campuran pasif menggunakan reka bentuk geometri saluran dalam meningkatkan prestasi pencampuran. Akan tetapi, reka bentuk yang canggih dan kompleks akan menyukarkan proses fabrikasi [9][10]. Oleh yang demikian, saluran mikro dengan struktur tiang yang tidak kompleks digunakan demi meningkat mekanisma pencampuran. Tiang mikro berfungsi memecah aliran laminar kepada dua aliran dan seterusnya bercantum semula. Pelanggaran aliran semasa proses percantuman akan menyebabkan kawasan interaksi antara bendalir bertambah di mana ianya meningkatkan kecekapan dalam proses pencampuran [11].

2. Model Pencampur Mikro

Model pencampur yang digunakan adalah sesalur berbentuk T yang bertiang seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 1. Struktur sesalur dihasilkan melalui model 3D dalam COMSOL Multiphysics 4.3a. Saluran mikro bertiang mempunyai dua salur masuk dan satu salur keluar. Peranti ini mengandungi 3 set rintangan yang terdiri daripada 6 tiang pada sisi kanan dan kiri saluran.



Rajah 1. Pencampur mikro dengan saluran bertiang. (a) SPr . (b) SPe. (c) SSi. (d) Titik pemerhatian selepas rintangan pertama dan salur keluar pada saluran mikro bertiang.

Kepekatan bendalir pada salur masuk 1 dan 2 ialah 0 mol/m^3 dan 5 mol/m^3 . Tiga jenis tiang dikaji pada saluaran mikro sepanjang $1800\mu\text{m}$ adalah saluran bertiang prisma (SPr), saluran bertiang petak (SPe) dan saluran bertiang silinder (SSi). Dimensi bagi tiang SPr ialah $1.25 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ manakala bagi tiang SPe $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ dan tiang SSi ialah $1.96 \times 10^{-7} \text{ m}^3$. Tiang mikro pertama terletak pada panjang peranti 0.4 mm dan 0.015 mm daripada sisi kiri saluran manakala tiang yang kedua terletak pada panjang peranti 0.6 mm dan 0.015 mm di sisi kanan saluran dalam satu set rintangan. Jarak diantara set rintangan ialah 0.25 mm . Sebanyak 3 set rintangan diletakkan pada saluran mikro.

3. Kaedah

COMSOL Multiphysics 4.3a diguna pakai bagi menjalankan proses simulasi dua model fizik iaitu *laminar flow* (spf) bagi tujuan analisa profil aliran bendalir dan *transport of diluted species* (chds) digunakan untuk mengkaji keupayaan campuran bagi saluran mikro. Mesh antara muka yang normal digunakan bagi proses simulasi. Halaju aliran pada salur masuk ialah dari nilai Re 10 hingga 150 dengan selang nilai 10 seperti Jadual 1.

JADUAL 1. HALAJU ALIRAN

Nilai Nombor Reynolds	Panjang Saluran Masuk (μm)	Aliran Masuk ($10^{-9}\text{m}^3/\text{s}$)
10	600	1.002
20	600	2.004
30	600	3.006
40	600	4.008
50	600	5.01
60	600	6.012
70	600	7.014
80	600	8.016
90	600	9.018
100	600	10.02
110	600	11.022
120	600	12.024
130	600	13.026
140	600	14.028
150	600	15.03

Kecekapan campuran dikenalpasti selepas bendalir melalui tiang pertama. Peningkatan peratusan kecekapan campuran dianalisa melalui 3 set rintangan. Rumus pengiraan kecekapan campuran adalah seperti berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - c_m)^2} \quad (2)$$

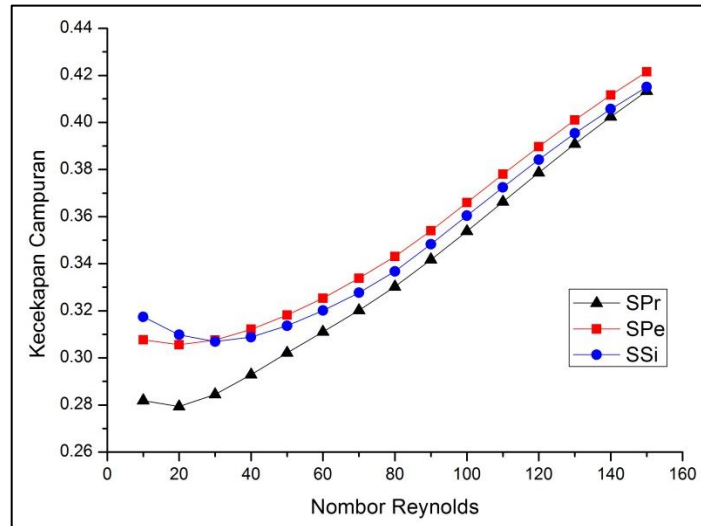
Persamaan 2 menunjukkan darjah campuran antara bendalir menggunakan rumus sisihan piawai di mana, σ ialah nilai sisihan kepekatan bendalir pada keratan rentas tertentu pada pencampur mikro; N jumlah titik kiraan dalam keratan rentas; c_i pecahan kepekatan dalam titik sampel i , dan c_m purata pecahan kepekatan. Julat nilai persamaan diantara 0 hingga 1 di mana 0 menunjukkan bendalir bercampur dengan sempurna dan 1 menunjukkan bendalir tidak bercampur.

$$M = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (3)$$

Kecekapan campuran, M boleh diterbitkan melalui persamaan (3) di mana σ_{max} adalah sisihan piawai pada saluran masuk peranti mikro [12]. Nilai σ_{max} di dalam kajian ini ialah 2.5.

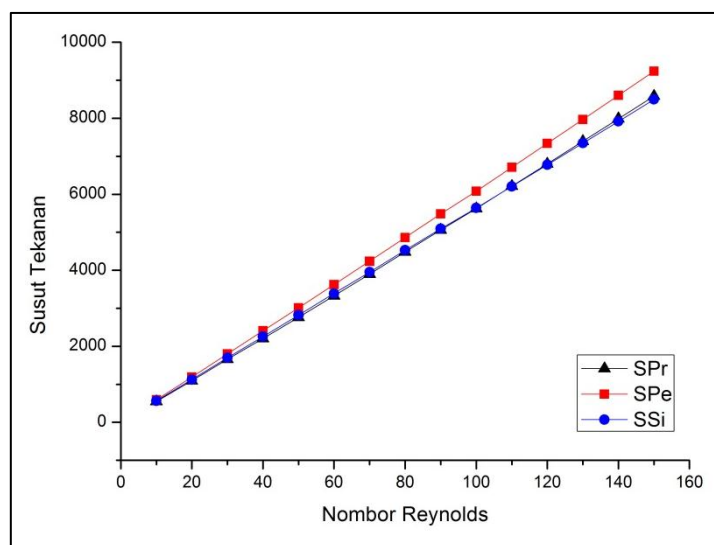
4. Hasil dan Perbincangan

Melalui COMSOL Multiphysics 4.3a, kepekatan bendalir dikira pada titik-titik tertentu iaitu pada titik selepas tiang mikro pertama dan juga pada saluran keluar bendalir.



Rajah 2 Kecekapan campuran saluran bertiang selepas tiang mikro pertama.

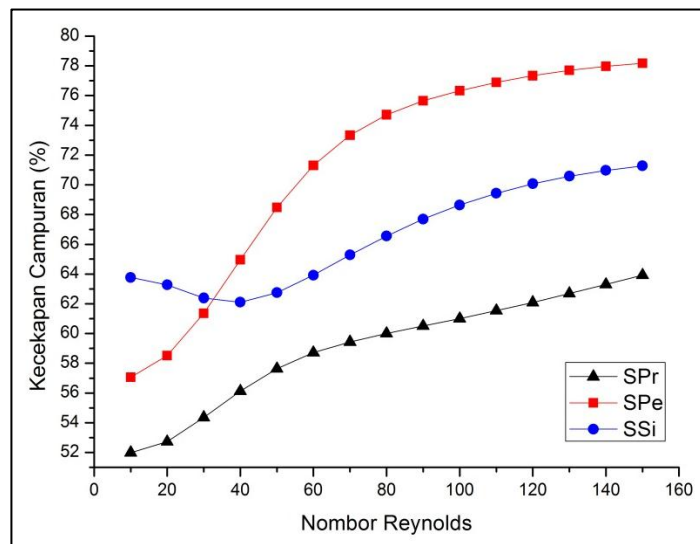
Rajah 2 menunjukkan kecekapan campuran selepas tiang mikro pertama. Ianya jelas bahawa pada nilai Re yang rendah, SSi mempunyai nilai prestasi pencampuran yang tinggi berbanding SPe dan SPr. Disebabkan kesan Coanda, aliran bercantum sebaik sahaja melalui tiang [13]. Kesan Coanda ini lebih tinggi pada SSi berbanding SPr dan SPe disebabkan oleh struktur permukaan tiang. Apabila nilai Re meningkat melebihi 50, kecekapan pencampuran bagi ketiga-tiga saluran mikro bertiang meningkat berkadar langsung secara linear. Fenomena ini terjadi oleh pergolakan alir lintang yang semakin kuat selepas aliran bendalir kembali bercantum selepas melalui tiang mikro seterusnya meningkatkan kawasan berhubungan antara bendalir [14].



Rajah 3: Susut tekanan bagi peranti sesalur mikro.

Rajah 3 menunjukkan susutan bagi tekanan untuk ketiga-tiga sesalur mikro bertiang. Nilai susut tekanan meningkat berkadaran dengan nilai nombor Reynolds [14][15]. Nilai susut tekanan yang tinggi beriringan dengan kadar pelepasan tenaga.

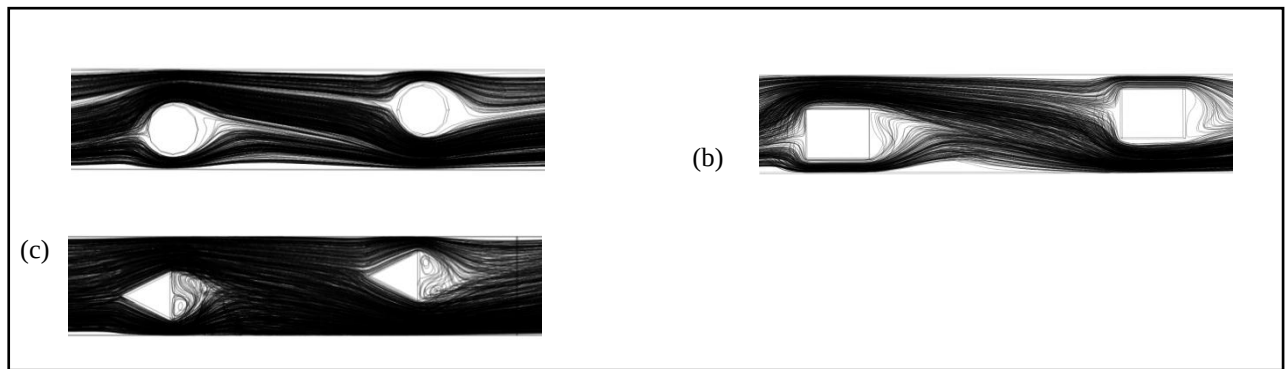
S_{Pe} menunjukkan nilai susut tekanan yang lebih tinggi berbanding S_{Pr} dan S_{Si}. Secara amnya, keupayaan campuran yang tinggi mempunyai nilai susut tekanan yang tinggi [14].



Rajah 4: Kecekapan campuran pada saluran keluar berkadaran dengan nilai Reynolds.

Rajah 4 menunjukkan kecekapan campuran pada saluran keluar peranti mikro. Hasil simulasi menunjukkan prestasi S_{Si} pada kadar nilai Re dibawah 60 menurun kemudiannya meningkat seiring dengan nilai Re seperti di dalam kajian [15]. S_{Si} dilihat mempunyai kecekapan campuran yang tinggi pada awalnya. Ini disebabkan permukaan struktur tiang S_{Si} tidak dapat memisahkan aliran dengan kuat serta campuran bendalir bergantung kepada resapan molekul di mana kadar halaju yang rendah membuatkan bendalir mempunyai masa yang lebih lama bagi proses resapan [12]. Keadaan seperti ini dapat dilihat melalui kajian yang dilakukan oleh [14][16] dimana pada kadar kelajuan yang rendah, keupayaan kecekapan campuran tinggi.

Mekanisma pencampuran bag S_{Pr} dan S_{Pe} pada nilai Re yang rendah bergantung pada resapan molekul. Disebabkan jarak pecahan bendalir bagi S_{Pr} dan S_{Pe} lebih jauh berbanding S_{Si}, kecekapan campuran pada nilai Re yang rendah S_{Si} lebih tinggi. Walaupun pada nilai Re 10, kecekapan campuran S_{Pe} dan S_{Pr} lebih tinggi daripada nilai Re 20 dan 30 oleh kerana halaju yang rendah menyebabkan masa yang lama bagi proses resapan molekul [12].



Rajah 4: Profil aliran bendalir melalui set rintangan ketiga pada nilai Re 100. (a) SSi. (b) SPe. (c) SPR.

Rajah 4 menunjukkan model aliran bendalir di dalam saluran mikro bertiang pada set rintangan yang ketiga dengan nilai Re 100. Ianya jelas kelihatan bahawa SSi dan juga SPe mempunyai aliran sekunder disebabkan proses pecah dan cantum aliran. Akan tetapi aliran sekunder yang terhasil masih tidak menjana aliran berpusar walaupun darjah perubahan aliran sekunder di dalam SPe tinggi [17].

Selepas melalui tiang mikro di dalam SPR, aliran bendalir mengambil jarak yang sedikit bagi bercantum kembali disebabkan perubahan aliran yang kuat oleh proses pecah dan cantum daripada struktur tiang mikro SPR. Aliran sekunder yang kuat ini telah menjana aliran berpusar sebaik melepasi tiang mikro dan ini menyebabkan kecekapan campuran meningkat. Pada nilai Re yang rendah, keadaan ini tidak terjadi oleh kerana halaju bendalir tidak cukup kuat bagi mempengaruhi aliran sekunder [17]. Walaupun SPR mampu menjana aliran berpusar, pusaran yang terhasil tidak dapat mempengaruhi aliran utama dengan berkesan dan menyebabkan keupayaan campuran sesalur mikro ini masih di bawah SSi dan SPe [18].

5. Kesimpulan

Kajian simulasi telah dijalankan bagi mengkaji profil aliran bendalir di dalam saluran *microfluidics* dengan pelbagai struktur tiang mikro. Di antara tiga saluran mikro bertiang, saluran mikro bertiang petak (SPe) menunjukkan hasil yang memberangsangkan dengan perubahan kadar nilai nombor *Reynolds* (Re) yang mana ianya penting bagi mendapatkan kepekatan larutan yang seragam dalam masa yang singkat. Saluran mikro bertiang silinder (SSi) menunjukkan kecekapan campuran pada kadar nilai Re di bawah 30 adalah tinggi disebabkan struktur tiang mikronya menghasilkan darjah permisahan aliran sekunder yang rendah, oleh itu, ianya mempunyai masa yang lama dalam interaksi antara bendalir seterusnya meningkatkan proses resapan molekul. Pencampur mikro pasif tidak menggunakan daya luaran bagi proses pencampuran yang menghasilkan haba berlebihan yang mampu mempengaruhi sel-sel biomolekul. Hasil kajian simulasi ini boleh dimanfaatkan dalam meramalkan mekanisme pencampuran dalam proses biokimia atau aplikasi peranti biomedikal.

6. Rujukan

- [1] S. Kandikar, S. Garimella, D. Li, S. Collin, M. King. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels, Second Edition. Elsevier Ltd. USA. 2014.
- [2] H.A. Stone, A.D. Stroock, A. Ajdari. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-chip, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36 (2004) 381–411
- [3] Bahadorimehr A., Y. Jumril Y., Majlis B.Y., Low Cost Fabrication of Microfluidic Microchannels for Lab-On-a-Chip Applications, 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA2010): pp. 242-244
- [4] I. L. Ahmad, M. R. Ahmad. Tapered Microchannel for multi-particles Passive Separation Based on Hydrodynamic Resistance. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 5(3)(2017): 628-635.
- [5] S. Azimi, M. Nazari, Y. Daghighi. Developing a fast and tunable micro-mixer using induced vortices around a conductive flexible link. *Physics of Fluids* 29(3)(2017) : 032004.
- [6] A. Nisar, N. Afzulpurkar. B. Mahaisavariya, A. Tuantranont. MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. *Sensors and Actuators B* 130 (2008): 917-942.
- [7] J. Johari, J. Yunas, A.A. Hamzah, B.Y. Majlis. Piezoelectric Micropump with Nanoliter Per Minute Flow for Drug Delivery Systems. *Sains Malaysiana* 40(3)(2011): 275-281
- [8] Capretto L., Cheng W., Hill M. & Zhang X. Micromixing Within Microfluidics Devices. *Top Curr Chem* 304(2011) 27–68
- [9] Bahadorimehr, A., Jumril, Y., Gebeshuber, I.C., Dee, C.F., Majlis, B.Y., Low cost fabrication of passive microfluidic devices, (2010) *2010 10th IEEE Conference on Nanotechnology, NANO 2010*, art. no. 5697855, pp. 1007-1011.
- [10] J. Yunas, J. Johari, A.R. Bahadorimehr, I.C. Gebeshuber and B.Y. Majlis, Investigation of Simple Process Technology for the Fabrication of Valveless Micropumps, *Adv. Mater. Research*. Vol. 254 (2011) pp 211-214.
- [11] Alam A. & Kim K.Y. 2015. Mixing performance of a planar micromixer with a circular chambers and crossing constriction channels. *Sensor and Actuators B* 176: 639–652
- [12] Hossain S., Ansari M.A., Kim K.Y. Evaluation of the mixing performance of three passive micromixers. *Chemical Engineering Journal* 150(2009) 492–501
- [13] C. Xu, Y. Chu. “Experimental study on oscillating feedback micromixer for miscible liquids using the Coanda effect,” *Transport Phenomena and Fluid Mechanics*, 2014.
- [14] X. Chen, J. Shen. Numerical analysis of mixing behaviors of two types of E-shape micromixers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 106 (2017) 593–600.
- [15] A. Alam, A. Afzal, K.Y. Kim, “Mixing performance of a planar micromixer with circular obstructions in a curved microchannel,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, pp. 423-434, 2014.
- [16] V. Viktorov, M. Nimafar, “A novel generation of 3D SAR-based passive micromixer: efficient mixing and low pressure drop at a low Reynolds number,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 23, art. 055023, 2013.
- [17] T.N.T. Nguyen, Min-Chan Kim, Joon-Shik Park, N.E Lee. An effective passive microfluidic mixer utilizing chaotic advection. *Sensors and Actuators B* 132 (2008) 172-181.

- [18] A. Najafi, S.S.H. Raad, R. Yousefi, "Self-propulsion in a low-Reynolds-number fluid confined by two walls of a microchannel," *Phys. Rev. E*, vol. 88, art. 045001, 2016.