



## Komputasi Dinamika Fluida pada T-Micro Mixer

Putri Ramadhany

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, Universitas Katolik Parahyangan  
Jl Ciumbuleuit No.94, Bandung, 40141

\*Alamat korespondensi: [pramadhany@unpar.ac.id](mailto:pramadhany@unpar.ac.id)

(Submisi: 26 Juli 2017; Revisi: 9 Oktober 2017; Penerimaan: 23 Oktober 2017)

### ABSTRACT

*Fluid diffusion can occur effectively if a high gradient concentration exists in every part of the fluid. This can be achieved by decreasing the cross section area of the channel into micro size. The miniatur size of micro mixer can be very effective for molecular diffusion in the mixing process. In this research, the modeling of mixing and heat transfer in the passive micro mixer was conducted. T-shaped mixer was chosen as micro mixer. Water was used as medium and passive tracers were added to differentiate water profile from two different inlets. Mixing and heat transfer profiles inside the T-micro mixer were observed. The computational fluid dynamics (CFD) modeling of mixing and heat transfer in the T-micro mixer was completed by ANSYS®. The effect of geometry and average input velocity of fluids on mixing process were observed. The result of this research included: (1) When the laminar flow is the dominant flow ( $Re$  is 25), the tracer mixing is not particularly seen. The tracer mixing is observed when the average velocity is increased ( $Re$  increases), (2) The heat flux to the wall ( $4.85 \times 10^{-6}$  Watt/m<sup>2</sup>) occurred when T-micro mixer is no longer isothermal, (3) The scale-up to factor ten does not necessarily improve the mixing performance ( $Re$  is kept constant), and (4) When the shape of cross section is changed to circle (cross section area is kept constant), the mixing performance is not necessarily improved.*

**Keywords:** *micro mixer, T shaped micro mixer, Reynolds number, laminar flow, computational fluid dynamics, CFD.*

### ABSTRAK

Difusi fluida dapat berjalan secara efektif jika memiliki gradien konsentrasi yang tinggi pada setiap bagian fluida. Hal ini dapat dicapai dengan memperkecil luas penampang pipa atau unit proses menjadi ukuran mikro. Ukuran yang kecil pada *micro mixer* menyebabkan difusi molekuler menjadi sangat efektif pada proses pencampuran. Pada penelitian ini, pemodelan untuk proses pencampuran dan perpindahan panas pada *micro mixer* pasif dilakukan. *Micro mixer* yang dipilih adalah jenis *mixer* berbentuk T (*T-micro mixer*). Air digunakan sebagai medium dan *tracer* pasif kemudian dimasukkan untuk membedakan profil air yang berasal dari dua inlet yang berbeda. Profil pencampuran dan perpindahan panas dalam *T-micro mixer* ini kemudian diamati. Pemodelan komputasi dinamika fluida pada *T-micro mixer* dilakukan dengan menggunakan program ANSYS®. Efek geometri *T-micro mixer* dan kecepatan fluida masuk diobservasi selama proses pencampuran. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah: (1) pada saat kondisi aliran *laminar* dengan  $Re = 25$ , terlihat tidak ada proses pencampuran *tracer* (*tracer mixing*). Pencampuran *tracer* terlihat ketika laju alir dinaikkan ( $Re$  meningkat), (2) fluks perpindahan panas keluar sistem sebesar  $4,85 \times 10^{-6}$  Watt/m<sup>2</sup> ketika kondisi *T-micro mixer* tidak lagi dijaga isothermal, (3) peningkatan kinerja pencampuran juga tidak terlihat

ketika *T-micro mixer* dilakukan *scale-up* sepuluh kali lebih besar dari referensi (Re dijaga konstan), dan (4) ketika bentuk penampang diganti dari segi empat menjadi lingkaran (luas penampang dijaga konstan), kinerja pencampuran tidak menjadi lebih baik.

**Kata kunci:** *micro mixer*, *T-micro mixer*, bilangan Reynolds, aliran *laminar*, komputasi dinamika fluida, CFD.

## 1. Pendahuluan

Proses pencampuran adalah proses yang banyak ditemukan dalam industri kimia. Jika proses pecampuran disertai dengan reaksi kimia cepat, derajat pencampuran akan menentukan distribusi produk. *Micro mixer* memiliki keunggulan dalam optimalisasi reaksi kimia cepat. Selain itu, ukuran yang kecil pada *micro mixer* membuat proses pencampuran relatif aman jika menggunakan bahan-bahan yang cenderung berbahaya (Koch, 2000).

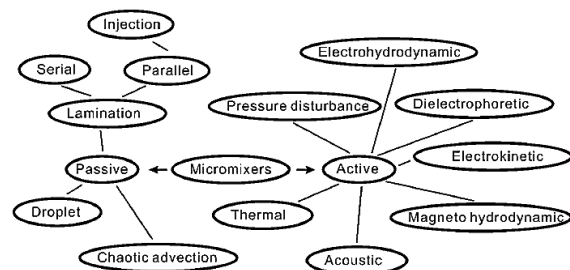
Pada dasarnya terdapat tiga jenis mekanisme pencampuran, yaitu difusi, konveksi, dan turbulensi. Mekanisme pencampuran difusi dan konveksi adalah basis mekanisme yang digunakan dalam mendesain *micro mixer*. *Micro mixer* berbasis difusi didesain untuk menciptakan gradien konsentrasi yang tinggi pada setiap bagian fluida (Hessel, 2016).

Berdasarkan prinsip pencampurannya, *micro mixer* dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu: *mixer* aktif dan pasif. *Mixer* pasif memanfaatkan energi laju alir (yang diberikan oleh pompa, perbedaan tekanan statis, dan geometri dari *micro mixer*) untuk memisahkan dan mencampur aliran. Pemisahan dan pencampuran aliran dapat meningkatkan proses difusi dan mendorong pembentukan aliran sekunder yang berbasis konveksi (Hessel, 2016).

*Micro mixer* aktif merupakan integrasi *micro mixer* pasif dengan menambahkan partisi yang dapat mendorong terjadinya pencampuran. Misalnya adalah pencampuran dengan menggunakan vibrasi, *ultrasound*, dan pengaduk. Tipikal *micro mixer* pasif dapat melakukan pencampuran dalam waktu kurang dari 100 ms (Wu, 2009). Waktu pencampuran yang pendek dapat dicapai ketika karakteristik dimensi sangat kecil atau laju alir yang sangat tinggi. *Micro mixer* pasif berdasarkan cara kerjanya terbagi

menjadi 3 jenis, yaitu laminasi, tetesan (*droplet*), dan *chaotic advection/vortex* (Gambar 1).

Kualitas pencampuran dapat ditingkatkan dengan memperpendek jalan pencampuran (*mixing path*) dan meningkatkan kontak permukaan antara dua aliran. *Micro mixer* laminasi memisahkan aliran masuk menjadi beberapa sub aliran untuk meningkatkan kontak permukaan. *Micro mixer* laminasi paralel dengan dua aliran masuk biasa disebut *T-mixer* dan *Y-mixer*. Pada penelitian ini, *T-mixer* digunakan sebagai basis pemodelan.



Gambar 1. Klasifikasi mikro mixer (Wu, 2009)

## 2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, dilakukan pemodelan komputasi dinamika fluida dalam *T-micro mixer*. Model matematika yang digunakan untuk mendeskripsikan proses pencampuran pada *T-micro mixer* berdasarkan pada persamaan kontinuitas, persamaan Navier-Stokes (momentum), dan persamaan konveksi-difusi (Persamaan 1-3).

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot u) \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (2)$$

$$\frac{Dc}{Dt} = D(\nabla^2 c) + R \quad (3)$$

Koefisien difusi ( $D$ ) ditentukan dengan menggunakan persamaan Stokes–Einstein (Persamaan 4). Dengan  $k_B$  adalah konstanta Boltzmann,  $\mu$  adalah viskositas dinamik,  $T$  adalah temperatur fluida, dan  $r$  adalah jari-jari partikel air (0,2 nm).

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\mu r} \quad (4)$$

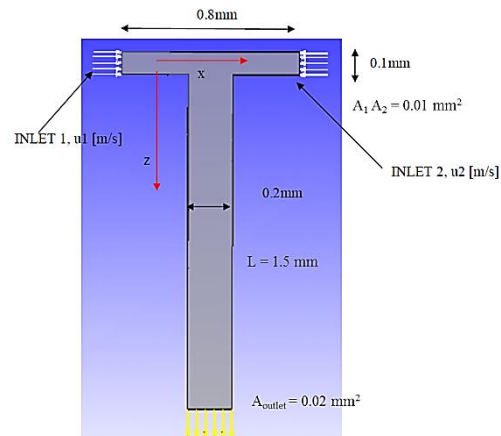
Model komputasi dinamika fluida dihasilkan menggunakan ANSYS®. ANSYS® adalah suatu program yang dapat digunakan untuk memberikan solusi numerik berdasarkan metode diskretisasi volume beda hingga (*volume of fluid model*) beserta simulasi visualnya. Salah satu solusi yang disediakan oleh ANSYS® adalah simulasi dinamika fluida. Dua tipe *solver* untuk simulasi dinamika fluida yang digunakan dalam ANSYS® adalah Algoritma Matriks Tri-Diagonal (TDMA) dan *conjugate direct method*. Dalam simulasi dinamika fluida, ANSYS® memiliki beberapa sub-produk yang dapat dimanfaatkan untuk membangun geometri sistem dan melakukan observasi profil pada sistem. Berikut tahap-tahap yang dilakukan untuk membangun model *T-micro mixer*:

1. *Design modeler*: Pada sub-produk ini, geometri dari sistem *T-micro mixer* dimasukkan ke dalam sistem. Geometri sistem dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.
2. ICEM HEXA: Sub-produk ini digunakan untuk menciptakan *mesh* atau struktur-struktur kecil dari suatu sistem. Semakin banyak *mesh* yang digunakan, maka model sistem akan semakin baik dan akurat. Akan tetapi jika jumlah *mesh* terlalu banyak, beban komputasi untuk menjalankan model akan menjadi sangat berat. Selain menciptakan *mesh*, sub-produk ini juga digunakan untuk mendefinisikan lebih lanjut bagian-bagian dari suatu geometri sistem yang sudah didefinisikan pada tahap awal.
3. CFX-PRE: setelah geometri sistem model *T-micro mixer* terbentuk, model diekspor ke sub-produk ini untuk menentukan kondisi batas.

4. CFX–*Solver Manager*: sub-produk ini digunakan untuk menjalankan model yang telah dibangun dan menyelesaikan masalah (*problem solving*).

5. CFX-Post: sub-produk digunakan untuk melihat profil di dalam suatu sistem.

Geometri pemodelan *T-micro mixer* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri *T-micro mixer*

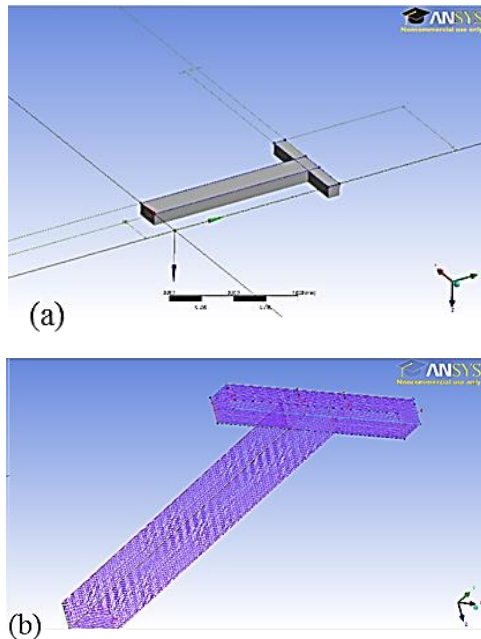
Rancangan dan kondisi batas pemodelan dapat dilihat pada Tabel 1. Variabel input pada ANSYS CFX-Pre (seperti model turbulensi dan perpindahan panas) didapatkan setelah melakukan perhitungan pada masing-masing kondisi operasi penelitian (akan dibahas pada Hasil dan Pembahasan). Kondisi operasi penelitian terbagi menjadi lima dan tertera pada Tabel 2.

Tabel 1. Rancangan pemodelan *T-Micro Mixer*

Sub-Produk	Variabel	Input
ICEM-HEXA	Jumlah mesh	58786 sel hexa
ANSYS CFX-Pre	User mode	Quick Setup Wizard
	Tipe simulasi	Steady State
	Tipe Domain	Single domain
	Model Turbulensi	Laminar
	Perpindahan panas	Bagian 1 & 2 : Isotermal (25 °C) Bagian 3 & 4 : Non – Isotermal
Kondisi batas	Input: <i>subsonic</i> Output: <i>subsonic</i> → tekanan outlet Tidak terjadi selip di dinding	

**Tabel 2.** Rancangan kondisi operasi penelitian

Variasi Parameter	1	2	3	4	5
$u_{inlet1}, u_{inlet2}$ (m/s)	0,165	2,5	2,5	2,5	2,5
$\mu$ (kg/m.s)	$8,89 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-4}$	$8,89 \times 10^{-4}$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	997	997	997	997	997
$T_{inlet1}, T_{inlet2}$ (°C)	25	25	160	160	25
$T_{wall}$ (°C)	25	25	60	60	25
$C_p$ (J/kg.K)	4181,7	4181,7	4181,7	4181,7	4181,7
$k$ (W/m.K)	-	-	0,6069	0,6069	-
Scale-up	-	-	-	10x	-
Bentuk penampang	Segi empat	Segi empat	Segi empat	Segi empat	Lingkar



**Gambar 3.** (a) *Design modeler* untuk menciptakan geometri sistem dan (b) ICEM HEXA untuk membuat *mesh*.

Pada penelitian ini, jumlah *mesh* yang digunakan adalah 58786 sel heksa dengan ketidaksimetrisan (*skewness*) sama dengan 0,72. Ketidaksimetrisan dapat digunakan sebagai indikator yang menunjukkan kualitas *mesh* dan kesesuaian rancangan pemodelan. Pemodelan terbaik dapat dicapai jika ketidaksimetrisan sama dengan nol. Namun, ketidaksimetrisan sama dengan nol diikuti dengan jumlah *mesh* yang tinggi. Akibatnya beban komputasi pun semakin meningkat. Untuk pemodelan yang menggunakan sel heksa, ketidaksimetrisan tidak boleh melebihi angka 0,85 untuk mendapatkan solusi yang akurat (Veenman, 2013). Ketidaksimetrisan 0,72 pada penelitian ini dinilai cukup baik (*fair quality*) karena selain pemodelan memberikan hasil yang cukup akurat, jumlah *mesh* yang tidak

terlalu tinggi juga tidak membebani komputasi proses. Strategi konvergensi yang dipilih adalah *Root Mean Square* (RMS) dengan target konvergensi  $10^{-4}$ . Target ini dinilai cukup baik untuk aplikasi *engineering*.

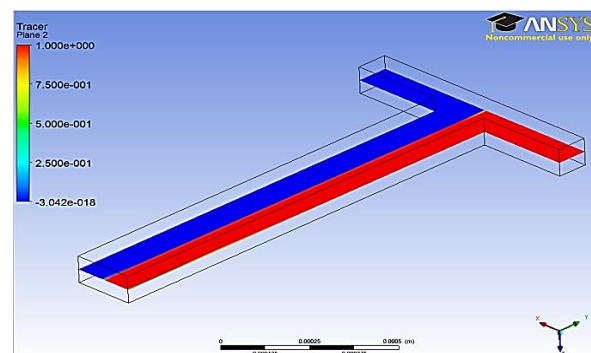
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Simulasi untuk Proses Isotermal dengan $u_{inlet} = 0,165$ m/s (Kondisi 1)

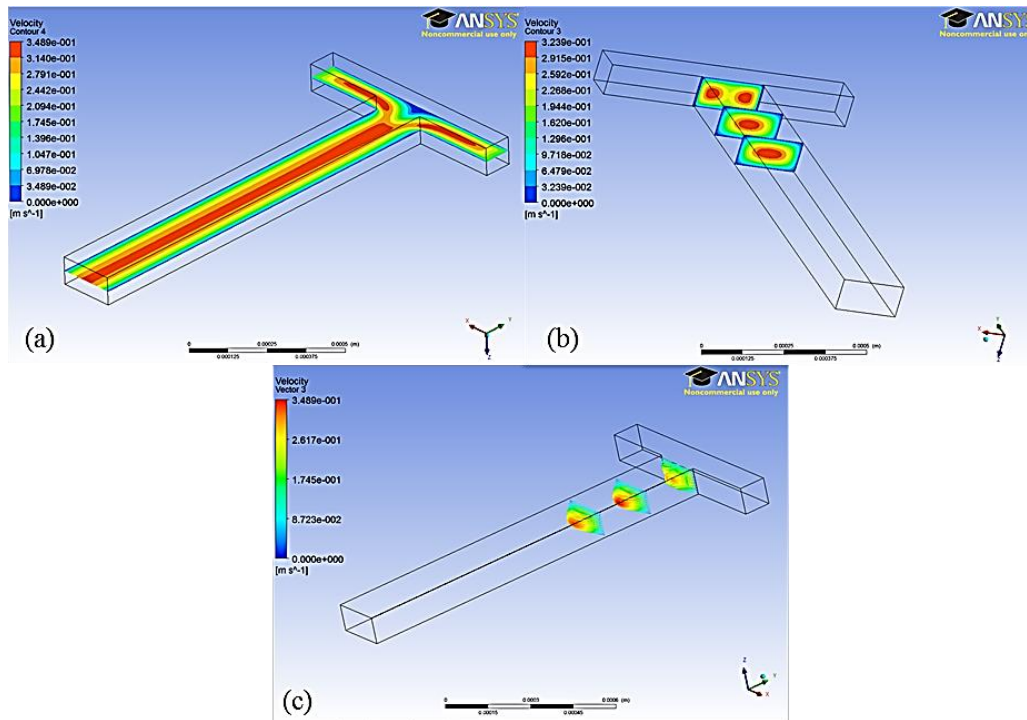
Sebelum menjalankan model, perlu dilakukan perhitungan bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk menentukan tipe aliran fluida dalam *T-micro mixer* (menggunakan Persamaan 5). Bilangan Reynolds yang dihitung berdasarkan kecepatan dan diameter hidraulik keluaran. Tipe aliran fluida ini kemudian dimasukkan sebagai input dalam ANSYS CFX-Pre.

$$Re = \frac{\rho d_h u}{\mu} \quad (5)$$

Dengan,  $\rho$  adalah densitas fluida (kg/m<sup>3</sup>),  $d_h$  adalah diameter hidraulik,  $d_h = \frac{2ab}{(a+b)}$ , dan  $\mu$  adalah viskositas dinamik (kg/(m.s)).  $a$  dan  $b$  adalah panjang dan lebar penampang. Kecepatan fluida ( $u$ ) adalah kecepatan rata-rata fluida.



**Gambar 4.** Profil *tracer* pada *T-micro mixer* dengan kondisi 1: Proses isotermal,  $u_{inlet} = 0,165$  m/s.



**Gambar 5.** (a) Profil kecepatan pada T-*micro mixer*, (b) *Contour* profil kecepatan pada arah z, dan (c) Vektor profil kecepatan pada arah z. Kondisi 1: Proses isothermal,  $u_{inlet} = 0,165$  m/s.

Dengan menggunakan Persamaan 5, bilangan Re yang didapatkan adalah 25. Karena nilai Re yang rendah maka model aliran yang digunakan adalah model *laminar*. Kinerja pencampuran fluida di dalam T-*micro mixer* ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada Gambar 4 terlihat *tracer* yang masuk pada inlet 1 berwarna biru, sedangkan yang masuk pada inlet 2 berwarna merah. Pada saat kecepatan masuk fluida dijaga 0,165 m/s, terlihat aliran *tracer* 1 berdampungan dengan aliran *tracer* 2. Aliran *tracer* ini membentuk dua area segregasi yang berbeda. Hal ini membuktikan bahwa proses pencampuran belum terjadi.

Pada dasarnya, proses pencampuran pada T-*micro mixer* pasif dipengaruhi oleh proses konveksi dan difusi. Persamaan perpindahan ditunjukkan pada Persamaan 6 yang merupakan penjabaran dari Persamaan 3.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + R \quad (6)$$

Dengan,  $c$  adalah konsentrasi *tracer*,  $u_{x,y,z}$  adalah kecepatan pada arah x,y,z,  $D$  adalah koefisien difusivitas, dan  $R$  adalah laju perubahan

konsentrasi karena reaksi (pada kasus ini tidak terjadi reaksi).

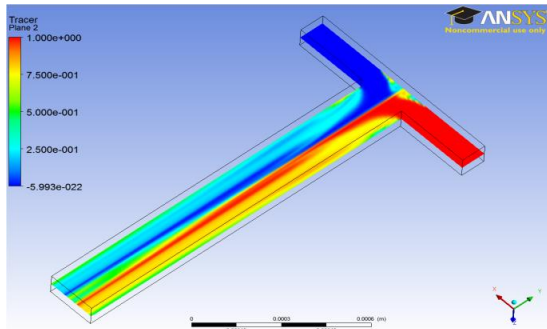
Ketika kecepatan fluida rendah (Re rendah), difusi adalah proses perpindahan yang paling dominan dibandingkan agitasi mekanik. Namun pada kondisi ini (Re = 25), proses difusi terjadi sangat lambat sehingga tidak terjadi penetrasi fluida di dalam sistem T-*micro mixer*. Untuk itu, diperlukan saluran atau pipa yang sangat panjang agar proses pencampuran dapat terjadi.

Profil kecepatan disajikan pada Gambar 5. Terbukti melalui pemodelan ANSYS® bahwa aliran yang terjadi di dalam sistem adalah aliran *laminar*.

### 3.2 Hasil Simulasi untuk Proses Isothermal dengan $u_{inlet} = 2,5$ m/s (Kondisi 2)

Selanjutnya kecepatan dinaikkan dari 0,165 m/s menjadi 2,5 m/s untuk menganalisis fenomena hidraulik yang terjadi pada T-*micro mixer*. Ketika kecepatan dinaikkan, bilangan Reynolds pun ikut meningkat (Re = 365), walaupun masih dalam kondisi aliran *laminar*.

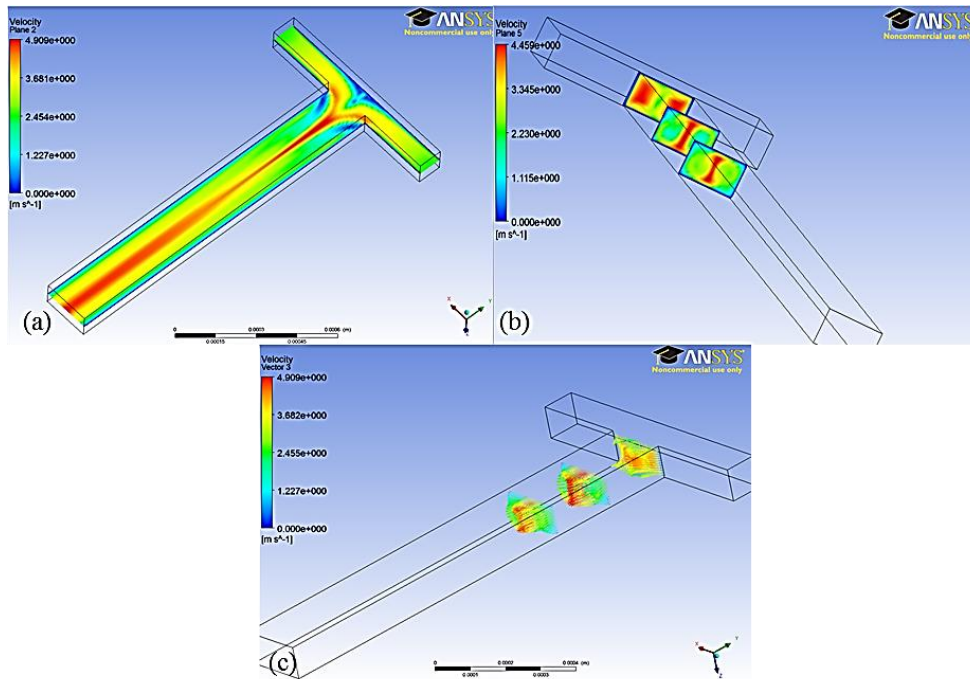




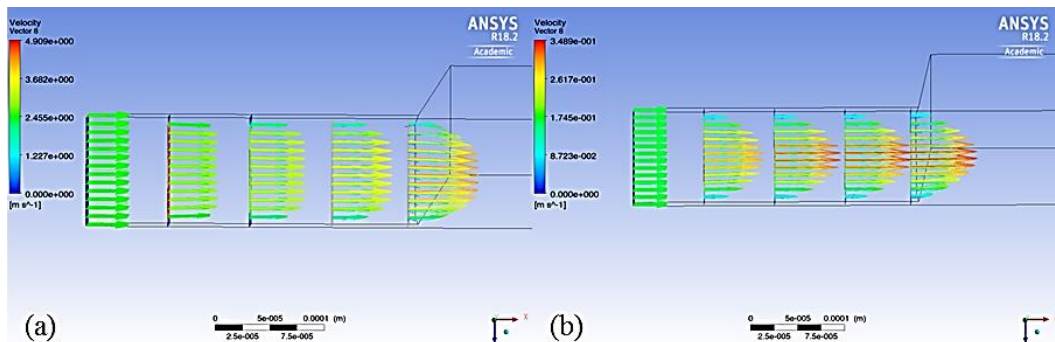
**Gambar 6.** Profil tracer pada T-micro mixer dengan kondisi 2: Proses isothermal,  $u_{inlet} = 2,5$  m/s.

Pada Gambar 6 terlihat bahwa *tracer* tidak lagi membentuk segregasi, melainkan terjadi proses pencampuran. Peningkatan kecepatan, selain meningkatkan kualitas pencampuran, juga mengakibatkan perubahan pola aliran. Gambar 7

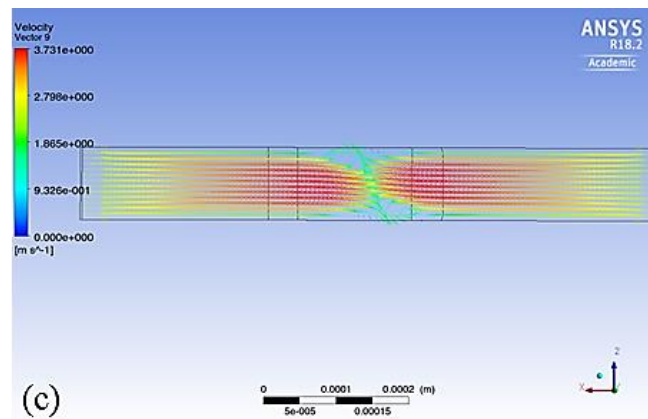
menunjukkan bahwa profil kecepatan ketika  $Re = 365$  membentuk pola vorteks ganda (*double vortex*) pencampuran. Kehadiran vorteks ganda ini yang diperkirakan menjadi penyebab meningkatnya kualitas pencampuran. Hal ini juga didukung oleh penelitian yang telah dilakukan Zhigang Wu (2009), bahwa kehadiran vorteks saat bilangan  $Re$  di atas 30, akan meningkatkan efisiensi pencampuran akibat meningkatnya kontak permukaan. Difusi masih menjadi proses perpindahan yang dominan dalam kondisi ini, karena aliran masih dalam kondisi *laminar*. Namun, konveksi juga memainkan peran dalam perpindahan massa ketika kecepatan dinaikkan.



**Gambar 7.** (a) Profil kecepatan pada T-micro mixer (b) *Contour* profil kecepatan pada arah z, dan (c) Vektor profil kecepatan pada arah z. Kondisi 2: Proses isothermal,  $u_{inlet} = 2,5$  m/s.

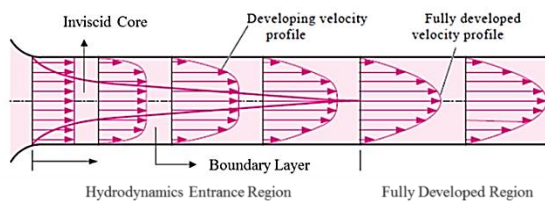


**Gambar 8a dan 8b.** Profil kecepatan masuk pada T-micro mixer (a)  $u_{inlet} = 2,5$  m/s, (b)  $u_{inlet} = 0,165$  m/s. Kondisi 2: Proses isothermal.



**Gambar 8c.** Profil kecepatan masuk dua aliran pada  $u_{inlet} = 2,5$  m/s. Kondisi 2: Proses isothermal.

Pada Gambar 8a, 8b, dan 8c ditampilkan profil kecepatan masuk fluida. Terlihat bahwa fluida yang masuk saat kecepatan 2,5 m/s ( $Re = 365$ ) tidak berbentuk kurva hiperbola sempurna atau masih berada pada *hydrodynamic entrance region*, sedangkan fluida dengan kecepatan 0,165 m/s ( $Re = 25$ ) memiliki bentuk kurva hiperbola sempurna atau sudah memasuki *fully developed region*. Pada aliran fluida *laminar* tipe ini, jika densitas dan viskositas kedua fluida memiliki nilai yang sama dan konstan, maka pencampuran dua aliran fluida akan membentuk satu aliran fluida yang juga memiliki kurva hiperbola sempurna atau *fully developed velocity profile* (Gambar 9).



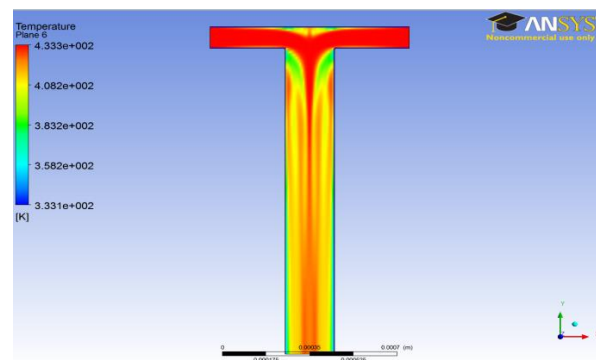
**Gambar 9.** Profil kecepatan aliran *laminar* (Cengel, 2006)

Saat kecepatan dinaikkan, profil kecepatan masuk belum memasuki *fully developed region*. Dimana fluida terletak pada dua area, yaitu *inviscid core* dan *boundary layer*. Pada area *inviscid core*, fluida memiliki profil seperti *plug flow* (kecepatan yang sama pada tiap titik) dan variabel viskositas dapat diabaikan. Sedangkan pada area *boundary layer*, hal tersebut tidak berlaku. Perbedaan viskositas dan gradien kecepatan pada dua area ini menyebabkan tahanan internal jika dua fluida yang masih

berada pada *hydrodynamic entrance region* bertemu. Tahanan ini menyebabkan perubahan profil kecepatan fluida campuran dan menimbulkan vorteks ganda.

### 3.3 Hasil Simulasi untuk Proses Non-Isotermal dengan $u_{inlet} = 2,5$ m/s (Kondisi 3)

Kondisi operasi pada kondisi 2 tetap dijaga, namun kondisi tidak lagi isothermal. Perbedaan temperatur antara fluida dan dinding *T-micro mixer* diperhitungkan. Kondisi operasi untuk kasus 3 ini ditampilkan pada Tabel 2. Profil temperatur pada arah x-z terdapat pada Gambar 10.



**Gambar 10.** Profil temperatur pada *T-micro mixer*. Kondisi 3: Proses non-isotermal,  $u_{inlet} = 2,5$  m/s.

Terlihat pada Gambar 10, temperatur mendekati dinding *mixer* menurun karena adanya perpindahan panas dari sistem ke lingkungan. Perpindahan panas pada *T-micro mixer* mengikuti Persamaan 7 dengan fluks perpindahan

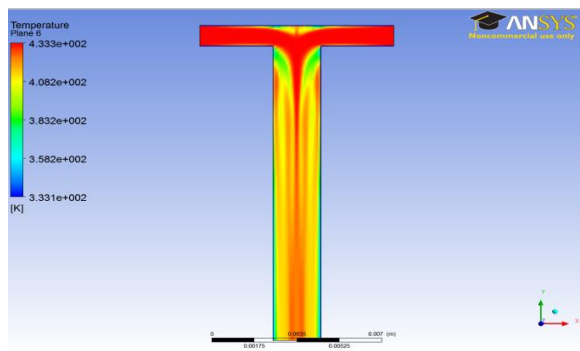
panas menuju dinding *T-micro mixer* adalah  $-4.85 \times 10^{-6}$  Watt/m<sup>2</sup> dengan temperatur rata-rata *outlet* adalah 392 K. Fluks perpindahan panas diasumsikan terjadi pada seluruh dinding *T-micro mixer* dengan temperatur dinding sama dengan 60°C (333 K) dan koefisien konduktivitas adalah 0,6069 W/m.K.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + R \quad (7)$$

### 3.4 Hasil Simulasi untuk Proses Non-Isotermal dengan $Re = 365$ dan *scale-up* (Kondisi 4)

Kondisi operasi pada kondisi 3 tetap dipertahankan, tetapi *T-micro mixer* dilakukan *scale-up* sepuluh kali lebih besar. Untuk menjaga bilangan Reynolds pada nilai 365, kecepatan *inlet* diturunkan menjadi 0,25 m/s.

Profil temperatur setelah *scale-up* ditunjukkan pada Gambar 11. Karena bilangan Reynolds dijaga konstan, profil temperatur setelah *scale-up* tidak mengalami perubahan jika dibandingkan dengan profil temperatur sebelumnya (Gambar 10).

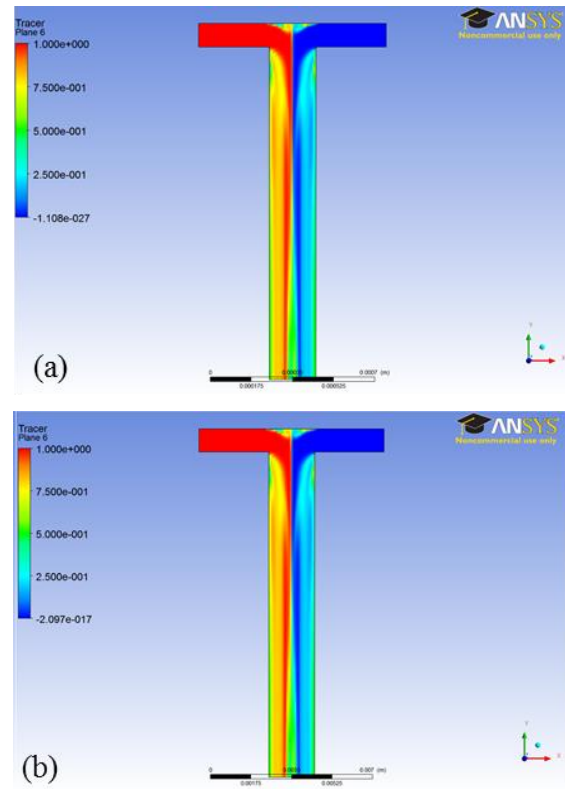


**Gambar 11.** Profil temperatur pada *T-micro mixer* (*scale-up* 10x). Kondisi 4: non-isotermal,  $Re = 365$ .

Pada Gambar 12, profil pencampuran pun tidak mengalami perubahan setelah dilakukan *scale-up*. Hal ini dikarenakan bilangan Reynolds yang dijaga konstan, sehingga kondisi dan karakteristik aliran masih sama.

Fluks perpindahan panas saat *T-micro mixer* dilakukan *scale-up* adalah  $-0,485 \times 10^{-6}$  Watt/m<sup>2</sup>. Nilai ini lebih kecil dari fluks perpindahan panas saat tidak dilakukan *scale-up*. Hal ini terjadi

karena rasio luas area dan volume lebih besar saat tidak dilakukan *scale-up*. Jika perpindahan panas diinginkan maka *T-micro mixer* tanpa *scale-up* dapat menjadi pilihan.

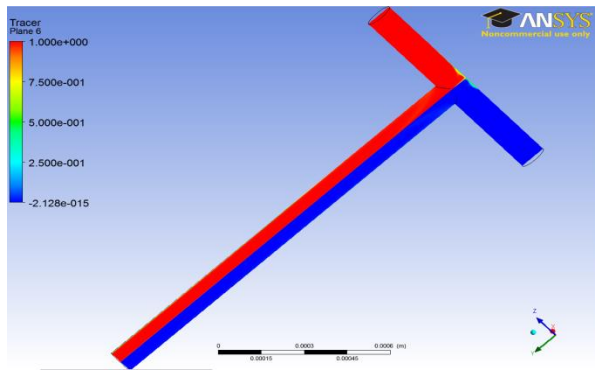


**Gambar 12.** (a) Profil tracer sebelum *scale-up* dan (b) setelah *scale-up*. Kondisi 4: non-isotermal,  $Re = 365$ .

### 3.5 Hasil Simulasi untuk Proses Isotermal dengan $u_{inlet} = 2,5$ m/s dan Penampang Lingkaran (Kondisi 5)

Dalam penelitian ini, bentuk penampang yang sebelumnya berbentuk segi empat diubah menjadi bentuk lingkaran. Diameter hidraulik *inlet* pada kondisi 2 digunakan sebagai diameter lingkaran, dimana luas penampang outlet dibuat sama dengan luas penampang *inlet* (sebelumnya luas penampang *outlet* 2x luas penampang *inlet*). Perhitungan bilangan  $Re$  yang didapat adalah 317, angka ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kondisi 2. Bilangan ini menunjukkan bahwa aliran dalam *T-micro mixer* masih dalam kondisi *laminar*.



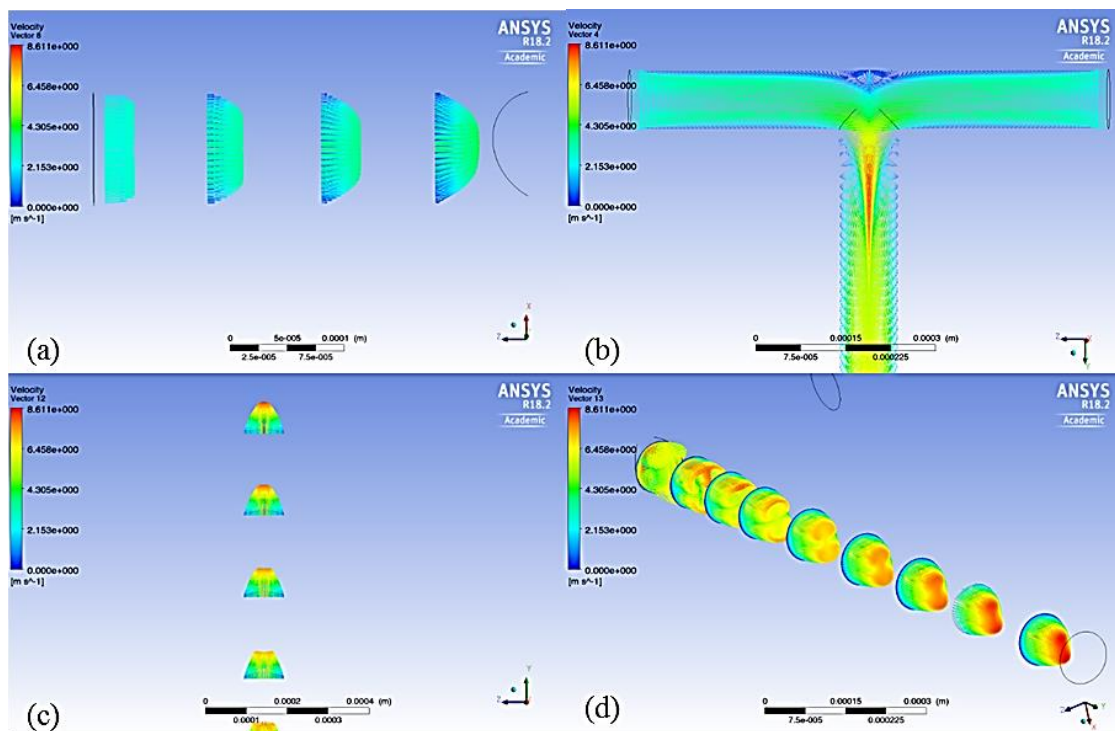


**Gambar 13.** Profil tracer pada T-micro mixer. Kondisi 5: isothermal,  $u_{inlet} = 2,5$  m/s, penampang lingkaran

Pada Gambar 13 terdapat dua segregasi tracer. Proses pencampuran hanya terjadi pada bagian atas dari pertemuan dua tracer, tetapi pada bagian T-micro mixer lainnya proses pencampuran tidak terjadi. Pada Gambar 14a tampak bahwa fluida belum memiliki bentuk hiperbola yang sempurna (*fully developed velocity profile*). Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, perbedaan gradien kecepatan dan viskositas pada fluida tipe ini akan menyebabkan perubahan profil kecepatan. Seperti pada Gambar 14c dan 14d, pertemuan dua fluida yang

belum memiliki *fully developed velocity profile* membentuk vorteks ganda. Berbeda dengan fenomena sebelumnya pada kondisi 2, vorteks yang terbentuk pada kondisi ini tidak saling bercampur. Namun seperti halnya dampak dari pertemuan dua fluida menyebabkan masing-masing fluida membentuk gerak putar lokal (*local rotary motion*). Fenomena ini yang menyebabkan aliran tetap pada segregasinya sendiri dan pencampuran tidak terjadi dengan baik.

T-micro mixer adalah salah satu mixer pasif yang energi laju alirnya dipengaruhi oleh geometri dari mixer (Gobby, 2001; Wu, 2009). Diperkirakan perubahan penampang akan mempengaruhi *shear stress* dalam T-micro mixer yang akibatnya mempengaruhi profil kecepatan masuk dan pencampuran. Dalam hal ini, penampang berbentuk persegi memberikan akses pencampuran lebih baik dibandingkan dengan penampang berbentuk lingkaran. Akan tetapi, hal ini perlu dibuktikan lebih lanjut melalui simulasi model tingkat lanjut dan eksperimen.



**Gambar 14.** Profil kecepatan pada T-micro mixer dengan penampang lingkaran: (a) profil fluida masuk, (b) tampak atas pertemuan dua fluida, (c) dan (d) profil kecepatan setelah pecampuran.

### 3.6 Konvergensi Simulasi

Untuk mengetahui kualitas simulasi, konvergensi menjadi salah satu parameter yang dapat diuji. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa target konvergensi yang dipilih adalah  $10^{-4}$ . Apabila simulasi mencapai target residual/konvergensi, maka simulasi model dianggap telah memberikan hasil yang akurat. Nilai konvergensi yang lebih besar dari target (misal:  $10^{-3}$ - $10^{-2}$ ) masih dapat diterima untuk memberikan penjelasan kualitatif aliran fluida namun tidak akurat dalam memberikan solusi kuantitatif (Veenman, 2013).

Pada penelitian ini, konvergensi tercapai pada seluruh simulasi. Akan tetapi pada Tabel 3, konvergensi persamaan kontinuitas (RMS Massa) pada simulasi kondisi 1 tidak mencapai target yang diharapkan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah penentuan *problem set-up*, pemilihan model matematik yang kurang akurat dalam menggambarkan dinamika fluida yang terjadi, dan jumlah *mesh*. Nilai konvergensi akan membaik jika parameter-parameter tersebut diperbaiki.

**Tabel 3.** Nilai residual kondisi simulasi

Parameter	Nilai Residual				
	1	2	3	4	5
RMS Massa	$7,9 \times 10^{-5}$	$8,6 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-9}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$
RMS Momentum	$1,8 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-8}$	$2,6 \times 10^{-8}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-8}$
RMS Energi	-	-	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	-

### 4. Kesimpulan

Bilangan Reynolds dapat dijadikan acuan untuk menentukan pola aliran suatu fluida. Ketika bilangan Reynolds dinaikkan (dalam penelitian ini dari  $Re=25$  menjadi  $Re=365$ ) maka kualitas pencampuran akan membaik. Melakukan *scale-up* dapat mengurangi fluks perpindahan panas karena rasio luas permukaan dan volume yang lebih kecil. Penampang berbentuk persegi memberikan akses pencampuran lebih baik dibandingkan dengan penampang berbentuk lingkaran.

Untuk penelitian selanjutnya, jumlah *mesh* dapat ditingkatkan untuk memberikan hasil yang

lebih akurat dan aliran masuk dapat dibuat lebih dari dua untuk meningkatkan kontak permukaan aliran fluida. Selain itu, validasi model simulasi dengan hasil eksperimen perlu dilakukan untuk mengetahui keakuratan fenomena aliran fluida melalui komputasi dinamika fluida.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Maurice Veenman (TU Eindhoven) yang telah memperkenalkan, mengajarkan, dan membantu penulis dalam melakukan simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

### Daftar Notasi

$c$	= konsentrasi ( $\text{mol/m}^3$ )
$C_p$	= kapasitas panas ( $\text{J}/(\text{kg.K})$ )
$D$	= koefisien difusivitas ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$d_h$	= diameter hidraulik (m)
$g$	= percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )
$k$	= konduktivitas thermal ( $\text{W}/(\text{m.K})$ )
$k_B$	= konstanta Boltzmann
$r$	= jari-jari partikel (m)
$R$	= <i>source term</i> baik di transfer momentum, massa ataupun panas
$Re$	= bilangan <i>Reynolds</i> (-)
$T$	= temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\rho$	= densitas ( $\text{kg/m}^3$ )
$u$	= kecepatan rata-rata fluida (m/s)
$\mu$	= viskositas fluida ( $\text{kg}/(\text{m.s})$ )

### Daftar Indeks

inlet	= fluida masuk
wall	= posisi dinding
x,y,z	= koordinat axis

### Daftar Pustaka

- Bird, B.R., 1960, Transport Phenomena, Wiley International.
- Bothe, D., Stemich, C., and Warnecke, H. J., 2006, Fluid Mixing in T-Shaped Reactors, Chemical Engineering Science, Vol. 61, pp. 2950-2958.
- Cengel, Y. and Cimbala, J., 2006, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw Hill, USA.
- Gobby, D., Angeli, P., and Gavriilidis, A., 2001, Mixing Characteristics of T-Type Microfluidic

- Mixers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 126-132.
- Hessel, V. and Noël, T., 2016, *Micro Process Technology*, *Ullmann's Handbook of Chemical Industry*, 1, 109-115.
- Koch, M., Vandenbussche, K.M., and Chrisman, R.W., 2007, *Micro Instrumentation for High Throughput Experimentation and Process Intensification – a Tool for PAT*, Wiley, USA.
- Veenman, M., 2013, *Introduction to CFD – DSM* Netherlands, TU Eindhoven.
- Wu, Z. and Nguyen, N.T., 2009, *Passive and Active Micromixers*, *Micro Process Engineering, Vol 1: Fundamentals, Operation, Catalyst*, Chap. 7, 175-202.
- Van der Wel, P. and Goris, D., 2014, *Choosing the Right Mixer*, *Artikel Hosokawa Micron BV*, 1-5.