

KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH *MICROMIXING* TERHADAP REAKSI PARALEL KOMPETITIF DI DALAM SISTEM REAKTOR ALIR TANGKI TERADUK

A. Altway, S. Winardi dan M. Rachimoellah^{*)}

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh letak atau posisi feed masuk, kecepatan pengadukan, waktu tinggal rata-rata dan tipe impeler terhadap tingkat micromixing dan yield reaksi paralel di dalam tangki pengaduk secara kontinyu. Sistem yang digunakan adalah tangki silindris beralas datar yang dilengkapi dengan 4 buah baffle dengan diameter $T = 0,2$ m dan $H = T$. Impeler yang digunakan adalah inclined fan turbine, fan turbine atau Rushton disc turbine 6 blade dengan diameter 6 cm, dengan jarak $1.3H$ dari dasar tangki. Reaksi paralel kompetitif yang dipelajari adalah reaksi netralisasi NaH_2BO_3 dengan H_2SO_4 dan reaksi oksidasi reduksi iodide-iodate yang menghasilkan iodine, dimana reaksi pertama jauh lebih cepat dari reaksi kedua. Tingkat micromixing diukur dengan menentukan bilangan segregasi dan kinerja reaktor yang diukur adalah yield pembentukan iodine. Sedangkan variabel percobaan adalah waktu tinggal yang divariasi dengan cara variasi laju alir inlet campuran NaH_2BO_3 , KI, dan KIO_3 sebesar 1 liter/menit, 1,5 liter/menit, dan 2 liter/menit. Konsentrasi NaH_2BO_3 , KI, dan KIO_3 di dalam campuran adalah: 0,0909 M, 0,0117 M, dan 0,0023 M. Laju alir larutan yang mengandung 0,3 M H_2SO_4 adalah 0,045 liter/menit; 0,068 liter/menit dan 0,09 liter/menit. Kecepatan putar impeler divariasi 100, 150, 200, 250, dan 300 rpm. Posisi pemasukan larutan divariasi H_2SO_4 yaitu: di dekat impeler, di daerah bawah impeler, dan di dekat permukaan. Hasil penelitian yang didapatkan, bahwa semakin besar kecepatan putar impeler dan semakin lama waktu tinggal dalam reaktor yield iodine yang dihasilkan semakin kecil. Posisi feed yang terbaik adalah terletak didekat impeler dengan koordinat $z' = 0,33$ dan $r' = 1,4$. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa impeler inclined fan turbine memberikan kinerja pencampuran yang lebih baik dibandingkan jenis impeler Rushton turbine dan fan turbine.

Kata kunci : micromixing, yield iodine, bilangan segregasi, reaktor alir tangki teraduk.

Pendahuluan

Tangki teraduk digunakan secara luas dalam banyak industri kimia, farmasi dan kilang minyak untuk pencampuran dan reaksi kimia seperti untuk menghasilkan *specialty chemicals*, obat-obatan, makanan, polimer, untuk proses netralisasi, kristalisasi dan lain-lain. Proses-proses ini umumnya meliputi reaksi-reaksi ganda. Untuk reaksi ganda, distribusi hasil reaksi merupakan indikator kinerja reaktor yang penting. Peranan pencampuran yang dibangkitkan impeler adalah untuk menimbulkan medan aliran turbulen yang meminimalkan gradien suhu dan konsentrasi, dan meningkatkan kontak antar senyawa-senyawa yang bereaksi. Transformasi bahan-bahan yang bereaksi terjadi pada skala molekuler, sehingga proses ini sangat bergantung pada kontak antar senyawa-senyawa yang bereaksi dan selanjutnya kontak ini dipengaruhi oleh fenomena pencampuran dalam skala molekuler yang disebut *micromixing*. *Micromixing* menjadi penting terutama untuk reaksi ganda yang relatif cepat dibanding kecepatan pencampuran. Dalam hal ini, fenomena

micromixing mempengaruhi distribusi produk reaksi dan waktu pencampuran menjadi lebih penting dari pada waktu reaksi. Lunden dkk (1995) melakukan pengukuran eksperimental dan prediksi teoritis waktu pencampuran cairan di dalam sistem tangki teraduk. Mereka juga mempelajari pengaruh berbagai faktor (operasi dan geometrik) terhadap waktu pencampuran. Patterson (1981) membahas pemodelan dan *scale up* reaktor kimia dengan memperhatikan fenomena pencampuran turbulen. Pengaruh pencampuran terhadap kinerja reaktor juga diamati dalam bioreaktor dimana mikroorganisme tumbuh. Berbagai metode dan alat telah diciptakan untuk menghasilkan pencampuran dengan mutu yang baik.

Penelitian-penelitian telah dilakukan untuk menyelidiki fenomena *micromixing* di dalam reaktor tangki teraduk secara eksperimental (Bourne dkk, 1992; Kevin dkk, 1992; Fournier dkk, 1996; Guichardon dkk, 1997; Phillips dkk, 1999; Guichardon dkk, 2001; Baldyga, dkk, 2001; Assirelli dkk, 2002). Sebagian peneliti-peneliti ini (Bourne dkk, 1992; Kevin dkk, 1992; Fournier dkk, 1996; Guichardon dkk,

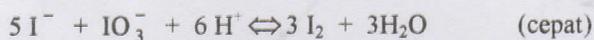
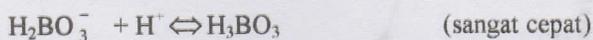
^{*)} Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Telp. (031) 5924448 Fax. (031) 5999282 Email: mixing@chemeng.its.ac.id

1997; Guichardon dkk, 2001) mengembangkan dan mengkaji uji kimia untuk mengevaluasi tingkat *micromixing* cairan di dalam tangki. Phillips dkk (1999) menyelidiki fenomena *micromixing* pada proses presipitasi di dalam reaktor tangki teraduk yang beroperasi secara semi batch. Assirelli dkk (2002) mempelajari fenomena *micromixing* di dalam sistem reaktor tangki teraduk yang dioperasikan secara semi batch dengan menggunakan uji kimia sistem reaksi paralel iodide-iodate. Sistem reaksi ini terdiri dari reaksi netralisasi sodium baborate dengan asam sulfat dan reaksi oksidasi reduksi iodide-iodate dengan suasana asam sulfat. Reaksi pertama jauh lebih cepat dari pada reaksi kedua. *Yield* produk reaksi kedua, yaitu iodine, merupakan indikator dari tingkat *micromixing*. Baldyga dkk (2001) mempelajari fenomena *micromixing* di dalam reaktor tangki teraduk yang dioperasikan secara kontinu menggunakan sistem reaksi paralel kompetitif yang terdiri dari reaksi netralisasi HCl dan hidrolisa *Ethyl Chloroacetate* dengan NaOH. Dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian-penelitian mengenai fenomena *micromixing* dilaksanakan dalam kondisi batch dan semi batch, walaupun Baldyga dkk (2001) telah melaksanakan penelitiannya di dalam reaktor tangki teraduk yang dioperasikan secara kontinu. Sedangkan sebagian besar sistem reaktor tangki teraduk di dalam industri dioperasikan secara kontinu. Penelitian kali ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh berbagai variabel seperti kecepatan putar impeler, waktu tinggal rata-rata, posisi aliran umpan, dan tipe impeler terhadap *yield* iodine pada sistem reaksi paralel kompetitif iodide-iodate yang terjadi di dalam reaktor alir tangki teraduk. Variabel-variabel ini dipilih karena menentukan tingkat *micromixing* cairan di dalam tangki.

Metoda Penelitian

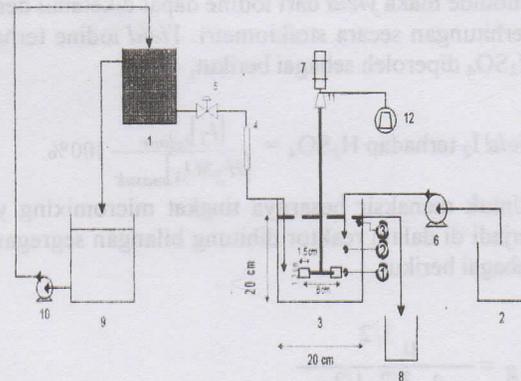
Penelitian ini mempelajari pengaruh *micromixing* pada reaksi kimia paralel kompetitif berikut, dimana reaksi pertama lebih cepat daripada reaksi kedua.



Reaksi pertama merupakan reaksi utama yang merupakan reaksi netralisasi NaH_2BO_3 dengan H_2SO_4 sedang reaksi kedua merupakan reaksi oksidasi-reduksi iodide-iodate dengan H_2SO_4 yang menghasilkan iodine. Konsumsi H_2SO_4 menurut reaksi pertama jauh lebih besar dari pada reaksi kedua. Penelitian berlangsung pada suhu 30°C . Reaktor yang digunakan adalah tangki silindris beralas datar dengan diameter $T=0,2$ m. Mula-mula tangki diisi dengan campuran larutan $0,0909$ M NaH_2BO_3 ; $0,0909$ M H_3BO_3 ; $0,0117$ M KI; dan $0,002333$ M KIO_3 . Tinggi cairan di dalam tangki adalah $H=T$. Tangki dilengkapi dengan pengaduk *inclined fan turbine*, fan turbine atau

Rushton disc turbine yang berdiameter $1/3$ diameter tangki dan dipasang pada jarak $1/3$ H dari dasar tangki. Volume cairan di dalam reaktor adalah $0,00628$ m³. Skema sistem peralatan percobaan yang digunakan ditunjukkan pada gambar 1. Ke dalam tangki dialirkan larutan asam sulfat $0,5$ M melalui pipa dengan diameter 2 mm, dan larutan yang mengandung $0,0909$ M NaH_2BO_3 , $0,0909$ M H_3BO_3 , $0,0116667$ M KI, dan $0,0023333$ M KIO_3 melalui pipa dengan diameter 10 mm. Laju alir larutan asam sulfat divariasi $0,045$; $0,068$, dan $0,09$ liter/menit, sedang laju alir campuran Borat, Iodide dan Iodate divariasi 1 ; $1,5$; 2 liter/menit (waktu tinggal rata-rata $360,574$, $240,316$, $180,287$ detik).

Sodium borat, NaH_2BO_3 , dibuat dengan mereaksikan NaOH dan asam borat. Kecepatan putar impeler divariasikan 100 , 150 , 200 , 250 , dan 300 rpm untuk memberikan energi dissipasi yang bervariasi sehingga dicapai tingkat *micromixing* yang bervariasi.



KETERANGAN GAMBAR

1. Tangki larutan campuran iodide, iodate, dan sodium borat
2. Tangki H_2SO_4
3. Reaktor
4. Rotameter campuran iodide iodate, dan sodium borat
5. Valve campuran iodide iodate dan sodium borat
6. Pompa H_2SO_4 (Dosing Pump)
7. Motor pengaduk
8. Pipa outlet
9. Tangki recycle untuk larutan campuran iodide-iodate NaOH dan Acid boric
10. Pompa Recycle
11. Gearbox Getriebebau Nord D 22941 Bargtheide, Germany
12. Inverter Nord type SK 01F-80L/4 No.200205131/001.

Gambar 1. Skema peralatan

Posisi pipa masuk umpan larutan H_2SO_4 divariasikan pada tiga posisi yang berbeda dan dinyatakan dengan bilangan tidak berdimensi, dengan arah radial ϕ sebesar 180° , koordinatnya dapat dilihat pada tabel 1. Sedang posisi umpan campuran diletakkan dengan arah radial $\phi=90^\circ$ dan dengan

Table 1. Variasi posisi aliran umpan H₂SO₄

posisi	Posisi(1)	Posisi(2)	Posisi(3)
z/H	0,23	0,33	0,92
r/D	1,4	1,4	2,4

posisi tetap pada jarak radial 1/3 T dari dinding tangki. Pipa keluaran reaktor terletak pada bagian atas reaktor sehingga cairan keluar secara overflow melalui pipa. Iodine yang terbentuk dari reaksi oksidasi-reduksi iodide-iodate bereaksi dengan I⁻ membentuk triiodide dengan persamaan sebagai berikut :



Triiodide dapat diukur dengan menggunakan instrumentasi spektrofotometer pada panjang gelombang 353 nm. Dengan menganalisa kadar triiodide maka *yield* dari iodine dapat diketahui dengan perhitungan secara stoikiometri. *Yield* iodine terhadap H₂SO₄ diperoleh sebagai berikut,

$$Yield\ I_2\ terhadap\ H_2SO_4 = \frac{[I_2]_{keluar}}{[H_2SO_4]_{masuk}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Untuk menaksir besarnya tingkat micromixing yang terjadi di dalam reaktor dihitung bilangan segregasi S_g sebagai berikut,

$$S_g = \frac{\mu^{3/2}}{4\pi^2 \rho^{3/2} \epsilon^{1/2} D \tau} \quad (2)$$

dimana $\epsilon = \frac{P/V}{\rho} = \frac{3 N^3 D^5}{V} \quad (3)$

Harga bilangan Segregasi yang kecil menunjukkan tingkat micromixing yang tinggi.

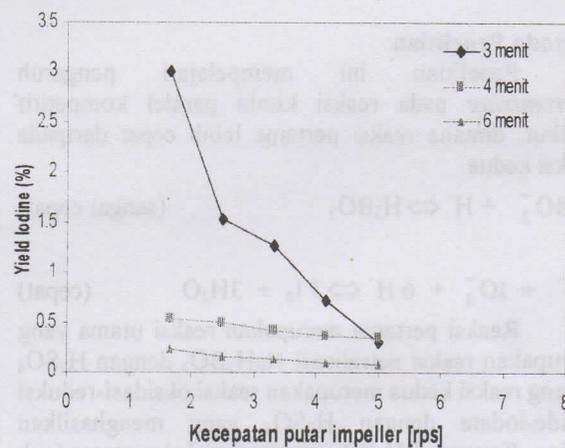
Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini dibahas pengaruh berbagai faktor terhadap jalannya sistem reaksi paralel iodide-iodate yang dinyatakan dengan *yield* iodine.

Pengaruh waktu tinggal rata-rata dan kecepatan putar impeler

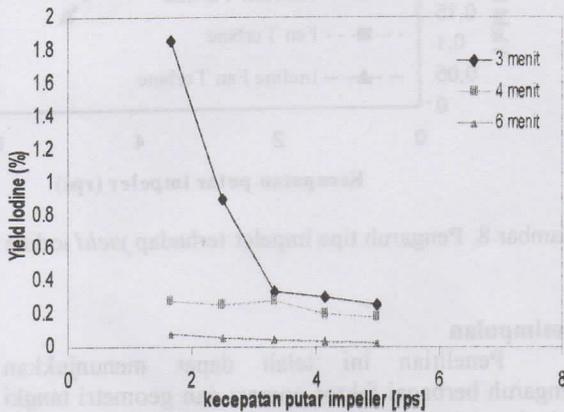
Gambar 2 dan 3 menunjukkan pengaruh kecepatan putar pengaduk dan waktu tinggal rata-rata terhadap *yield* iodine berturut-turut untuk posisi umpan asam sulfat diantara dasar tangki dan impeler ($r'=1,4$ dan $z'=0,23$) dan pada daerah aliran impeler ($r'=1,4$ dan $z'=0,33$). Terlihat adanya kecenderungan bahwa waktu tinggal semakin lama *yield* iodine yang dihasilkan akan semakin rendah. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu tinggal di dalam reaktor, tingkat

pencampuran di dalam reaktor makin baik sehingga peluang untuk terjadinya reaksi samping yang menghasilkan iodine makin kecil yang membuat *yield* iodine rendah. Kecenderungan pengaruh waktu tinggal terhadap *yield* iodine hampir sama untuk kedua posisi umpan H₂SO₄. Kedua gambar ini juga menunjukkan bahwa makin besar kecepatan putar impeler *yield* iodine yang dihasilkan makin kecil. Kecepatan putar impeler akan mempengaruhi turbulensi pencampuran, yaitu semakin besar kecepatan putar impeler maka turbulensi pencampuran juga semakin besar. Turbulensi dapat ditunjukkan dengan tingkat micromixing yang terjadi. Bila turbulensi tinggi maka tingkat micromixing juga tinggi karena secara molekuler reaktan-reaktan sudah sangat terdispersi, begitu juga sebaliknya bila turbulensi rendah maka tingkat micromixing yang terjadi juga rendah akibat masih tersegregasinya molekul-molekul reaktan. Turbulensi akan membantu meningkatkan laju difusi molekuler yang akan meningkatkan kontak antara molekul-molekul senyawa kimia dalam hal ini molekul-molekul reaktan, sehingga yang berlangsung adalah reaksi pertama yang lebih cepat yaitu reaksi antara ion H₂BO₃⁻ dengan ion H⁺ membentuk asam borat, maka kesempatan untuk reaksi kedua atau reaksi pembentukan iodine semakin kecil sehingga *yield* iodine yang terbentukpun makin kecil. Kecenderungan pengaruh waktu tinggal rata-rata dan kecepatan putar impeler terhadap *yield* iodine pada penelitian ini adalah sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Baldyga dkk (2001) yang menyatakan bahwa dengan kenaikan kecepatan putar impeler dan waktu tinggal rata-rata maka *yield byproduct* yang dihasilkan akan semakin kecil. Baldyga menggunakan sistem reaksi netralisasi HCl dengan NaOH dan reaksi



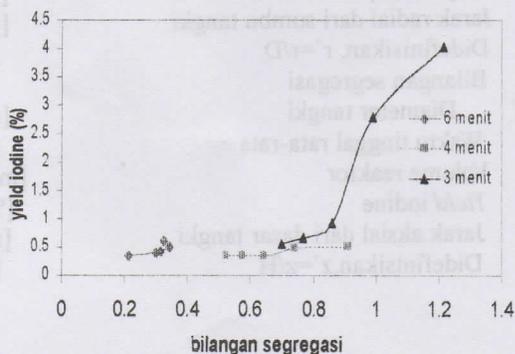
Gambar 2. Hubungan kecepatan pengadukan (rps) dengan *yield* iodine dengan posisi $r'=1,4$ dan $z'=0,23$ dengan *inclined fan turbine*

hidrolisa *ethyl chloroacetate*. Sistem reaksi ini serupa dengan sistem reaksi yang digunakan pada penelitian ini yaitu sistem reaksi paralel kompetitif dengan reaksi pertama jauh lebih cepat dari pada reaksi kedua.

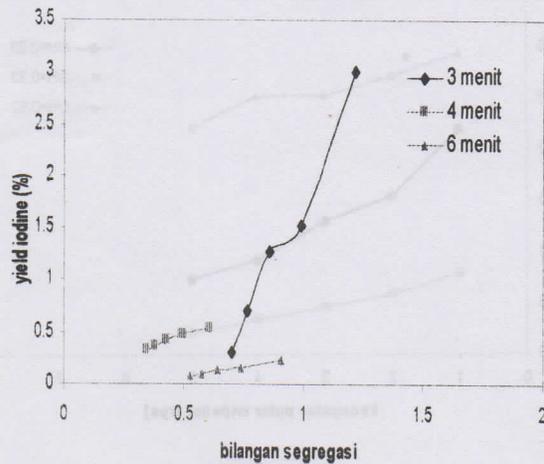


Gambar 3. Hubungan Kecepatan pengadukan (rps) dengan *yield iodine* dengan posisi $r'=1.4$ dan $z'=0.33$ dengan *inclined fan turbine*

Pengaruh kecepatan putar impeler dan waktu tinggal rata-rata dapat digabungkan menjadi satu variabel tak berdimensi yang disebut bilangan Segregasi. Bilangan Segregasi berkaitan dengan tingkat *micromixing* yang terjadi di dalam tangki. Makin kecil bilangan Segregasi, makin besar tingkat *micromixing* cairan di dalam tangki. Hubungan antara bilangan Segregasi dan *yield iodine* ditunjukkan pada gambar 4 dan 5 berturut-turut untuk posisi umpan asam sulfat di daerah aliran impeler dan di daerah dekat permukaan. Terlihat bahwa makin besar bilangan Segregasi atau makin kecil tingkat *micromixing*, *yield iodine* akan makin besar. Pada gambar-gambar ini juga nampak bahwa hubungan antara *yield iodine* dan bilangan segregasi terpecah menjadi tiga kurva dengan waktu tinggal rata-rata yang berbeda-beda. Pengaruh bilangan Segregasi terhadap *yield iodine* paling nyata untuk waktu tinggal yang yang paling kecil yaitu 3 menit



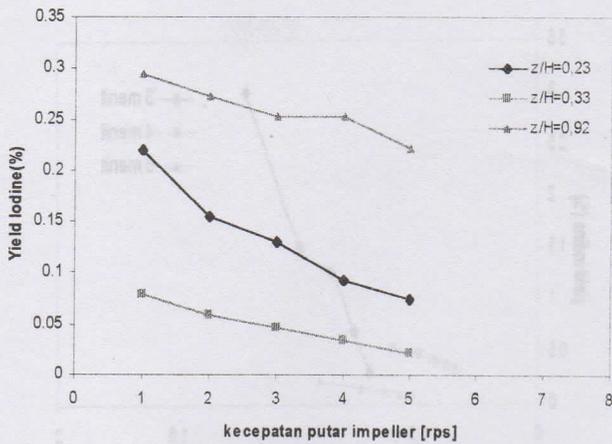
Gambar 4. Hubungan bilangan segregasi dengan *yield iodine* untuk posisi $r'=1.4$ dan $z'=0.33$



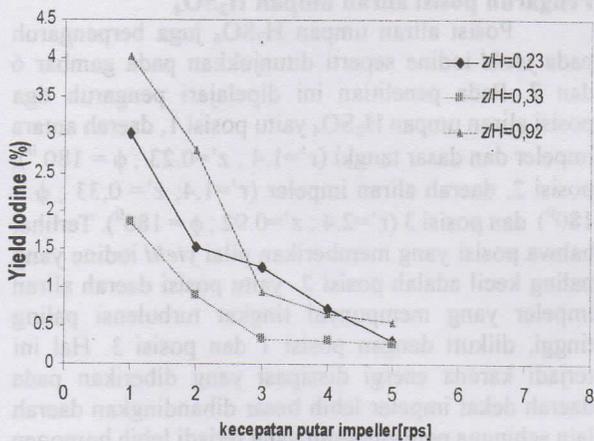
Gambar 5. Hubungan bilangan segregasi dengan *yield iodine* untuk posisi $r'=1.4$ dan $z'=0.92$

Pengaruh posisi aliran umpan H_2SO_4

Posisi aliran umpan H_2SO_4 juga berpengaruh pada *yield iodine* seperti ditunjukkan pada gambar 6 dan 7. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh tiga posisi aliran umpan H_2SO_4 yaitu posisi 1, daerah antara impeler dan dasar tangki ($r'=1.4$; $z'=0.23$; $\phi = 180^\circ$); posisi 2, daerah aliran impeler ($r'=1.4$; $z'=0.33$; $\phi = 180^\circ$) dan posisi 3 ($r'=2.4$; $z'=0.92$; $\phi = 180^\circ$). Terlihat bahwa posisi yang memberikan nilai *yield iodine* yang paling kecil adalah posisi 2 yaitu posisi daerah aliran impeler yang mempunyai tingkat turbulensi paling tinggi, diikuti dengan posisi 1 dan posisi 3. Hal ini terjadi karena energi dissipasi yang diberikan pada daerah dekat impeler lebih besar dibandingkan daerah lain sehingga pencampuran yang terjadi lebih homogen sehingga reaksi pertama yaitu reaksi netralisasi $H_2BO_3^-$ lebih cenderung terjadi. Posisi 3 dengan $z'=0.92$ dan $r'=2.4$ adalah paling jauh dari impeler sehingga pengaruh energi dissipasi di daerah ini relatif kecil, yang menyebabkan turbulensi di daerah ini kecil maka *yield iodine* cenderung besar. Adapun di posisi 1, *yield iodine* yang dihasilkan di daerah ini lebih kecil daripada posisi 3. Ini dimungkinkan karena posisi 1 berada dekat dengan dinding samping dan bawah, yang memungkinkan terjadinya tabrakan molekul dengan dinding, yang menyebabkan turbulensi pada posisi 1 lebih besar daripada posisi 3, dan secara otomatis *yield iodine* yang dihasilkan lebih kecil.



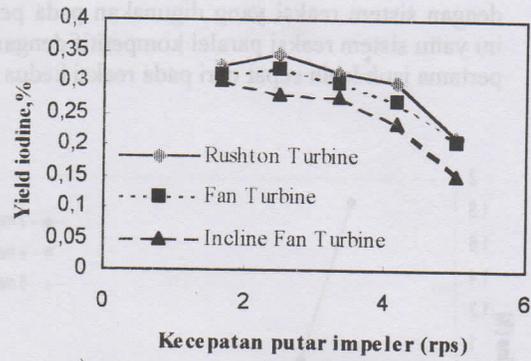
Gambar 6. Pengaruh posisi feed terhadap yield iodine menggunakan impeler *inclined fan turbine*, t_m= 3 menit



Gambar 7. Pengaruh posisi feed terhadap yield iodine menggunakan impeler *inclined fan turbine*, t_m= 6 menit

Pengaruh tipe impeler

Geometri impeler sangat mempengaruhi pola aliran yang ditimbulkannya. Dengan demikian, jenis impeler yang berbeda akan memberikan karakteristik aliran turbulen yang berbeda di dalam tangki, sehingga akan berpengaruh terhadap yield iodine yang dihasilkan sebagaimana ditunjukkan pada gambar 8. Terlihat bahwa jenis impeler *inclined fan turbine* memberikan yield iodine yang terkecil, sedang jenis impeler *Rushton turbine* memberikan yield iodine yang terbesar. Hal ini disebabkan karena *inclined fan turbine* membangkitkan aliran dengan tingkat *micromixing* terbesar, sedang *Rushton turbine* membangkitkan aliran dengan tingkat *micromixing* terkecil.



Gambar 8. Pengaruh tipe impeler terhadap yield iodine

Kesimpulan

Penelitian ini telah dapat menunjukkan pengaruh berbagai faktor operasi dan geometri tangki terhadap jalannya sistem reaksi iodide-iodate yang dinyatakan dengan yield iodine. Dapat disimpulkan pada penelitian ini bahwa terjadi interaksi antara pengaruh kecepatan putar pengaduk dan waktu tinggal rata-rata terhadap yield iodine, misal pada kecepatan putar yang rendah (100 rpm) terjadi penurunan yield iodine yang cukup signifikan dengan kenaikan waktu tinggal rata-rata, namun pada kecepatan putar impeler yang tinggi (300 rpm), kenaikan waktu tinggal dari 3 menit sampai 6 menit hanya sedikit menurunkan yield iodine. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa posisi aliran umpan H₂SO₄ didaerah dengan tingkat turbulensi tinggi yaitu didaerah aliran impeler memberikan yield iodine yang paling rendah. Hasil ini menunjukkan keuntungan pengaliran umpan reaktan terbatas ke daerah aliran impeler. Akhirnya, penelitian ini menunjukkan bahwa tipe impeler *inclined fan turbine* memberikan kinerja terbaik dibanding tipe impeler *Rushton turbine* atau *fan turbine*.

Daftar Notasi

D	Diameter Impeler	[m]
∅	Difusifitas	[m ² /s]
H	Tinggi liquid	[m]
P	Daya dissipasi	[w]
r	Jarak radial dari sumbu tangki	[m]
r'	Didefinisikan, r'=r/D	[-]
Sg	Bilangan segregasi	[-]
T	Diameter tangki	[m]
t _m	Waktu tinggal rata-rata	[s]
V	Volume reaktor	[m ³]
Xs	Yield iodine	[%]
z	Jarak aksial dari dasar tangki	[m]
z'	Didefinisikan, z'=z/H	[-]

Huruf Latin

ε	Laju energi dissipasi	[w/kg]
ϕ	Sudut diukur dari baffle kanan	[$^{\circ}$]
μ	Viskositas	[Pas]
ρ	Densitas	[kg/m ³]

Ucapan Terima Kasih

Kami ucapkan terima kasih kepada Project QUE Batch III Jurusan Teknik Kimia ITS atas bantuan dana untuk penelitian ini. Kami ucapkan terima kasih pula kepada mahasiswa-mahasiswa S1 kami: Umami Kaltsum, Nur Adi Cahyaning, Ekawati dan Sophia Dian K yang membantu kami dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

Assirelli, M., Bujalski, W., Nienow, A.W. and Eaglesham, A., (2002), "Study of *Micromixing* in Stirred Tank Using a Rushton Turbine: Comparison Of feed Position and Other Mixing Devices", *Proceeding CHISA*, Praha, Ceko-slowakia

Baldyga J., Henczha, M., Mokowski, L., (2001), "Effect of Mixing on Paralel Chemical Reaction in a Continous Flow Stirred Tank Reaktor", *Trans. I. Chem. E*, 79, Part A, pp. 895-900.

Bourne, J.R.O, Kut, M. and Lenzner, J., (1992), "An Improved Reaction System to Investigate *Micromixing* in High-intensity Mixer", *Ind.Eng.Chem.Res.*, 32, 3, pp. 949-958.

Fournier, M.C., Falk, L., and Villermaux, J., (1996), "A New Parallel competing Reaction System for Assessing *Micromixing* Efficiency - Experimental Approach", *Chem. Eng. Sci.*, 51(23), pp. 5053

Guichardon, P., Falk, L., and Villermaux, J., (1997), "Extension of a Chemical Method for the Study of *Micromixing* Process in Viscous Media", Elsevier Science Ltd., pp. 4649-4658.

Guichardon, P., Falk, L., and Andrieu, M., (2001), "Experimental Comparison of the Iodide-Iodate and the Diazo Coupling *Micromixing* Test Reaction in Stirred Reactors", *Trans.IChemE*, 79, Part A, pp. 906-914.

Kevin, V., Wenger, Dunlop, E.H., and MacGilp, I.D., (1992), "Investigation of the Chemistry of aDiazo *Micromixing* Test Reaction", *AIChE J.*, 38, 7, pp. 1105-1114

Lunden,M. Stenberg, O. and Andersson, B., (1995), "Evaluation of a Method for Measuring Mixing Time Using Numerical Simulation and Experimental Data", *Chem.Eng.Commun.*, 139, pp. 115-136.

Patterson, G.K., (1981), "Invited Review:Application of Turbulence Fundamentals to Reaktor Modelling and Scale-up", *Chem.Eng.Commun.*, 8, pp. 25-52

Philip, R., Rohani, S. and Baldyga, J., (1999), "*Micromixing* in a Single-Feed Semi batch Precipitation Process", *AIChE J.*, 45, 1, pp. 82-92.