

Unjuk Kerja Reaktor *Cascade* Bentuk Kolom

Hary Sulistyono dan Merry Ad'hadhi

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM

Abstract

Some heterogeneous reactions such as liquid-solid, liquid-liquid were undertaken in the stirred tank batch reactor. To change a batch process into flow process, plug flow reactor is the reactor with the similar performance to the batch reactor. However, it would be faced with problem to attain the plug flow pattern. A cascade of ideally mixed reactor was reactor which has a similar performance with the plug flow reactor especially for heterogeneous system.

Experiment was undertaken in the column which was divided into three sections. This is similar with the three mixed flow reactors. Sodium chloride was used as a tracer and water as fluid flow. It was investigated two variables such as stirred speed and ratio of impeller diameter to the distance of the cascade.

In this paper, Bodenstein number of pipe flow reactor and the number of stages for the cascade were determined experimentally from the residence time distribution of the fluid. It is shown that the results good agreement with the empirical equation proposed by Pawlowski (1962) and Elgeti (1996).

Pengantar

Dua bentuk ideal model aliran dalam reaktor alir ialah *plug flow* (PF) dan *mixed flow* (MF). Untuk aliran PF koefisien dispersinya nol sedang untuk aliran MF koefisien dispersi tak terhingga nilainya. Bentuk ideal pada kenyataannya ialah aliran PF untuk reaktor alir pipa (RAP) sedang aliran MF untuk reaktor alir tangki berpengaduk (RATB). Meskipun demikian, kedua sifat aliran tersebut dapat diperlakukan satu dengan yang lain. Untuk RATB dapat memiliki sifat aliran mendekati PF bila RATB tersebut disusun seri, sedangkan RAP dapat mendekati aliran MF bila sebagian hasil didaurulang ke dalam aliran umpan reaktor. Perubahan perilaku aliran itu sering dilakukan agar reaksi yang terjadi sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai contoh untuk reaksi heterogen cair-cair, cair-padat yang dilakukan di reaktor *batch* yang berbentuk tangki berpengaduk. Untuk mengubah proses *batch* menjadi proses alir, unjuk kerja reaktor alir yang sesuai adalah reaktor alir pipa (PF model). Akan tetapi agar pencampuran sempurna dan sifat aliran PF tidak mungkin dilakukan dalam RAP. Untuk itu reaksi dijalankan dalam RATB yang disusun seri

sehingga pencampuran sempurna dan sifat aliran mendekati aliran PF. Untuk menjamin pengaliran lebih lancar, untuk reaksi cair padat, dapat dipilih reaktor kolom yang dibentuk *cascade* dan dilengkapi dengan pengaduk.

Untuk RATB disusun seri atau biasa disebut *N tank in series* dapat dicari korelasi bilangan dispersi dengan banyaknya RATB. Bilangan dispersi sering dinyatakan dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang disebut bilangan Bodenstein (Pawlowski, 1962; Elgeti, 1996; Levenspiel, 1999) sebagai berikut.

$$Bo = \frac{uL}{D} \quad (1)$$

Pawlowski (1962) mengajukan kaitan bilangan dispersi dengan N banyaknya RATB seri dengan persamaan berikut.

$$Bo = \sqrt{4(N-1)^2 - 1} \quad (2),$$

sedangkan Elgeti (1996) menjabarkan dari neraca massa di reaktor, akhirnya diperoleh persamaan.

$$Bo = 2(N-1) \quad (3)$$

Untuk mencari model dispersi atau *N tank in series* dalam reaktor alir, pada umumnya dicari

berdasarkan distribusi waktu tinggal zat alir dalam reaktor (Fogler, 1999; Levenspiel, 1999; Missen *et. al.*, 1999). Beberapa peneliti telah mengembangkan model dan jenis reaktor. Kemblowski dan Pustelnik (1988) meneliti pengaruh bahan isian berupa *Kenic Static Mixer (KSM)* dalam RAP. Ternyata, ukuran KSM mempengaruhi hasil antara teoritis dengan hasil percobaan. Pengembangan model dispersi akan dipengaruhi oleh penentuan kondisi awal dari pemasukan *tracer* (Hsu dan Dranoff, 1986), sedangkan Nalitham dan kawan-kawannya (1987) mencoba reaktor alir tiga fase padat, cair dan gas. Reaktor berbentuk kolom dan diperoleh hasil bilangan dispersi lebih rendah dari pendekatan teoritis di pustaka. Pada RATB tunggal dan sifat aliran *turbulen*, kondisi operasi mendekati ideal (Sulistyo dan Handayani, 1997)

Landasan Teori

Distribusi waktu tinggal zat alir di dalam reaktor dapat dihitung dari konsentrasi *tracer* yang keluar dari reaktor (Fogler, 1999; Levenspiel, 1999; Missen *et. al.*, 1999).

$$E(t) = \frac{c(t)}{C_0} \quad (4)$$

$$C_0 = \int_0^{\infty} c(t) dt \quad (5)$$

sedang waktu tinggal rerata dicari dengan persamaan berikut.

$$t^* = \int_0^{\infty} tE(t) dt \quad (6)$$

dari persamaan distribusi di atas dapat dihitung nilai varian yaitu,

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t^*)^2 E(t) dt \quad (7)$$

Nilai varian bila disajikan dalam bentuk tak berdimensi menjadi,

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t^{*2}} \quad (8)$$

Nilai varian akan dipengaruhi oleh bilangan dispersi maupun N . Hubungan antar keduanya dinyatakan dengan persamaan berikut (Fogler, 1999; Levenspiel, 1999; Missen *et. al.*, 1999).

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad (9)$$

dan

$$\sigma_{\theta}^2 = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - \left(2\frac{D}{uL}\right)^2 (1 - \exp(-\frac{uL}{D})) \quad (10)$$

Penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai N dan bilangan dispersi pada reaktor *cascade* bentuk kolom. Kedua parameter itu dicari berdasarkan distribusi waktu tinggal zat alir di reaktor.

Pelaksanaan Penelitian

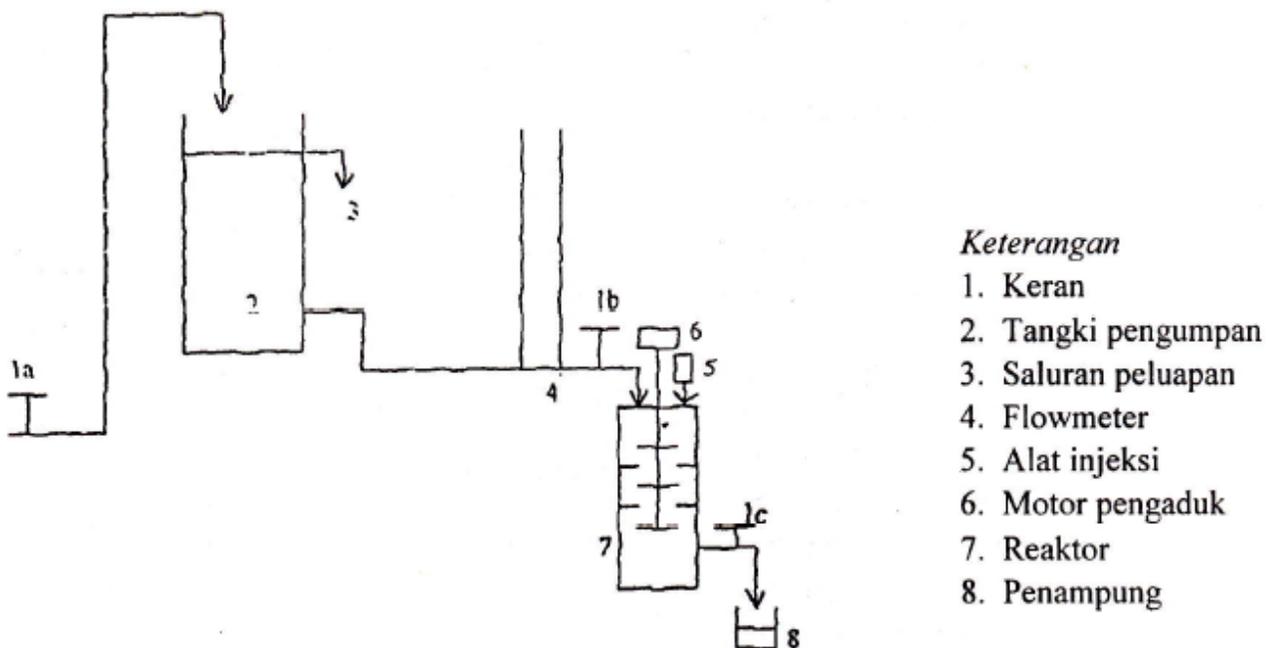
Air suling mempunyai kekentalan 0,01cp dan rapat massa 0,9972 g/cm³ digunakan sebagai zat alir.

Natrium klorida sebagai zat penjejak (*tracer*) dengan kemurnian 98,87 % dilarutkan dalam air sampai konsentrasi tertentu.

Rangkaian alat yang digunakan dapat dilihat pada gambar 1. Reaktor berupa kolom dilengkapi dengan pengaduk dan sekat-sekat sebagai pembatas bentuk *cascade*. Jumlah sekat ada 2 sehingga reaktor ini dapat dianggap sebagai 3 RATB disusun seri.

Ukuran reaktor dapat dijelaskan sebagai berikut. Diameter kolom 0,15 m, tinggi kolom 0,50 m, diameter pengaduk 0,075 m. Jarak antara dua sekat yang merupakan tinggi dari tiap *cascade* antara 0,075 m sampai 0,15 m sesuai dengan perbandingan yang diinginkan. Diameter lubang pada tiap sekat 0,05 m.

Mula-mula tangki pengumpan diisi air sampai penuh dan sebagian keluar melalui saluran peluapan sehingga ketinggian air dalam tangki pengumpan dapat dianggap tetap dengan mengatur keran 1a. Selanjutnya air diumpankan ke dalam reaktor dengan laju alir tetap yang dilakukan dengan mengatur keran 1b. Untuk mengatur ketinggian air di reaktor selalu tetap dengan mengatur keran 1c. Motor pengaduk dihidupkan dan kecepatan putar pengaduk dijaga tetap. *Tracer* dengan volume tertentu dimasukkan ke dalam aliran umpan secara *pulse input*. Aliran yang keluar dari reaktor ditampung pada gelas penampung dan pada setiap selang waktu tertentu dianalisis konsentrasi *tracer*. Percobaan dihentikan setelah dalam aliran keluar tidak mengandung *tracer* lagi.



Gambar 1 Rangkaian alat percobaan

Analisis hasil dilakukan dengan mengambil cuplikan cairan yang keluar. Selanjutnya analisis dilakukan dengan cara volumetri menggunakan larutan perak nitrat standar. Selanjutnya hasil analisis dibuat data konsentrasi *tracer* dan waktu, kemudian dibuat juga data distribusi waktu tinggal pada pelbagai waktu.

Bilangan dispersi dicari dengan persamaan (10) dengan cara *trial and error* sedang N dicari dengan persamaan (9). Bilangan dispersi disajikan dalam bentuk bilangan Bodenstein (1).

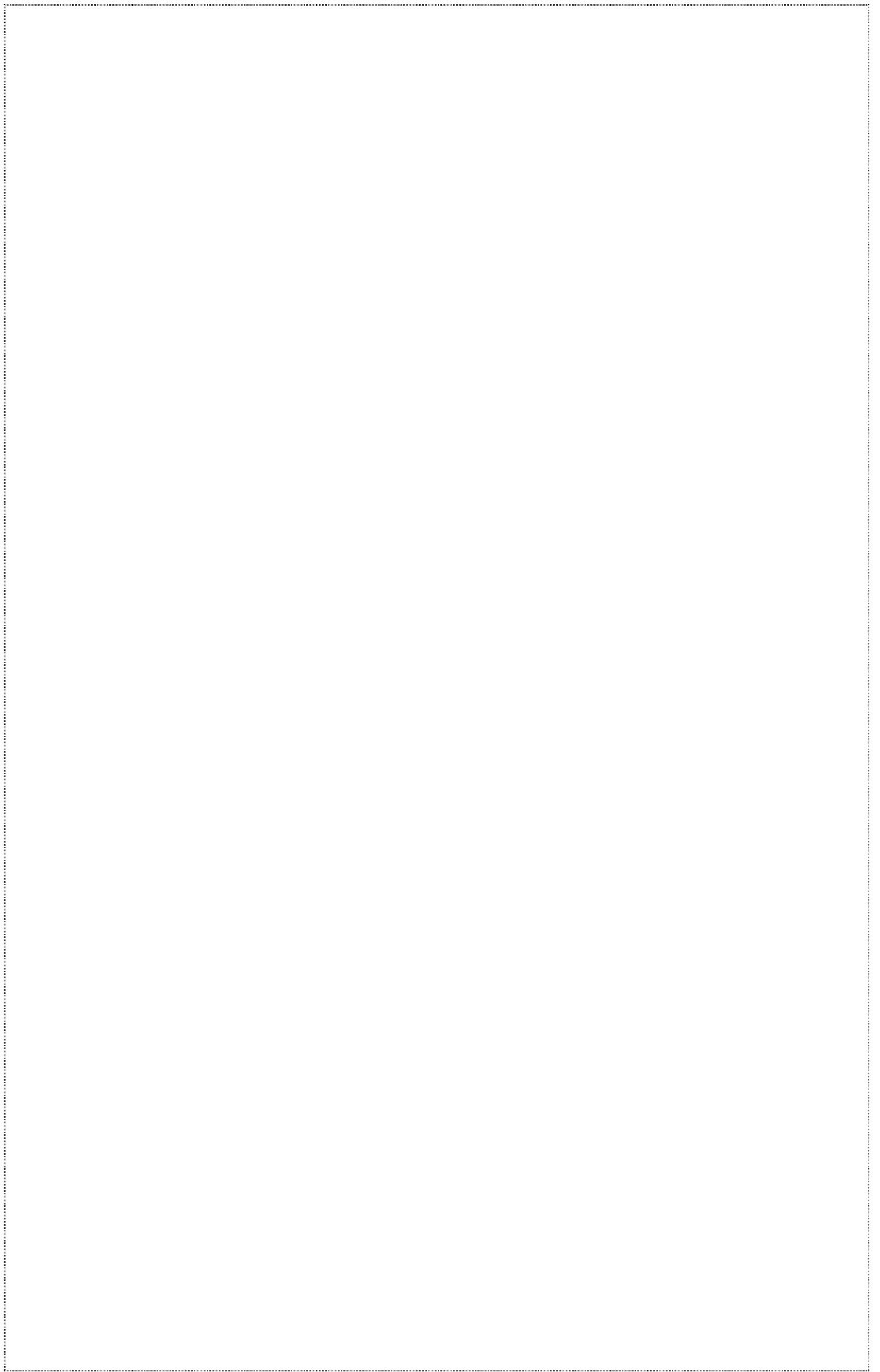
Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada penelitian ini digunakan reaktor *cascade* yang berbentuk kolom dan diharapkan dapat berlaku sebagai RATB yang disusun seri. Untuk itu dipilih model N RATB seri untuk mengetahui penyimpangan dari keadaan ideal pada pelbagai kondisi proses. Disamping itu juga dianalisis model dispersi. Kedua model dicari berdasarkan distribusi waktu tinggal zat alir dalam reaktor.

Waktu tinggal merata zat alir dalam reaktor dapat dihitung berdasarkan dua cara yaitu waktu tinggal merata teoritis dan waktu tinggal merata sesungguhnya (Sulistyo dan Handayani, 1997). Pada penelitian ini disetiap percobaan dibuat waktu tinggal merata teoritis tetap.

Pengaruh kecepatan putar pengaduk

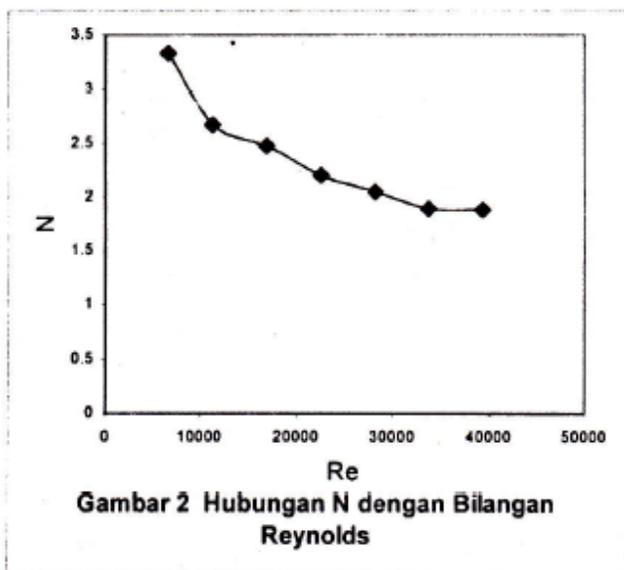
Pengaruh kecepatan putar pengaduk terhadap unjuk kerja reaktor dapat dilihat pada daftar I dan gambar 2 yang menunjukkan bahwa semakin cepat putaran pengaduk banyaknya N RATB disusun seri semakin sedikit, dan bilangan Bodenstein semakin kecil atau bilangan dispersi semakin besar. Keadaan ini mungkin disebabkan oleh semakin cepat pengadukan, maka pencampuran kembali (*back mixing*) zat alir dalam reaktor semakin besar dan dispersi zat alir juga semakin sempurna. Akan tetapi pada putaran pengaduk 360 rpm ($Re = 33750$) dan 420 rpm ($Re = 39375$) perubahan baik nilai N maupun bilangan dispersi cukup kecil. Keadaan ini dapat dijelaskan bahwa turbulensi di reaktor untuk terjadinya pencampuran (*back mixing*) sudah mencapai nilai maksimal sehingga peningkatan nilai bilangan Reynolds kurang berpengaruh terhadap perubahan N maupun bilangan dispersi. Sebaliknya pada kecepatan putar pengaduk yang rendah nilai N semakin besar dan bilangan dispersi semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pengadukan pada tiap *cascade* semakin sempurna dan tidak ada pencampuran kembali (*back mixing*) zat alir antar *cascade*. Sebagai contoh pada putaran 70 rpm ($Re = 6562$) nilai $N = 3,33$ (dibulatkan menjadi 3) dan bilangan dispersi 0,1834, sedang pada putaran 360 rpm ($Re = 33750$) dan 420 rpm ($Re = 39375$) nilai N berubah berturut-turut 1,90



dan 1,88 (dibulatkan menjadi 2) dan bilangan dispersi naik menjadi 0,4285 dan 0,4360. Oleh sebab itu bila kecepatan pengaduk semakin besar maka sifat reaktor akan menuju ke reaktor MF dan bila kecepatan pengaduk diperlambat nilai N akan bertambah sehingga sifat reaktor akan mendekati reaktor PF.

Daftar I Pengaruh kecepatan putar pengaduk

Putaran rpm	Re	$\frac{D}{uL}$	Bo	N
70	6562	0,1834	5,4525	3,33
120	11250	0,2468	4,0518	2,67
180	16875	0,2762	3,6205	2,47
240	22500	0,3291	3,0385	2,21
300	28125	0,3727	2,7085	2,15
360	33750	0,4285	2,3337	1,90
420	39375	0,4360	2,2935	1,88



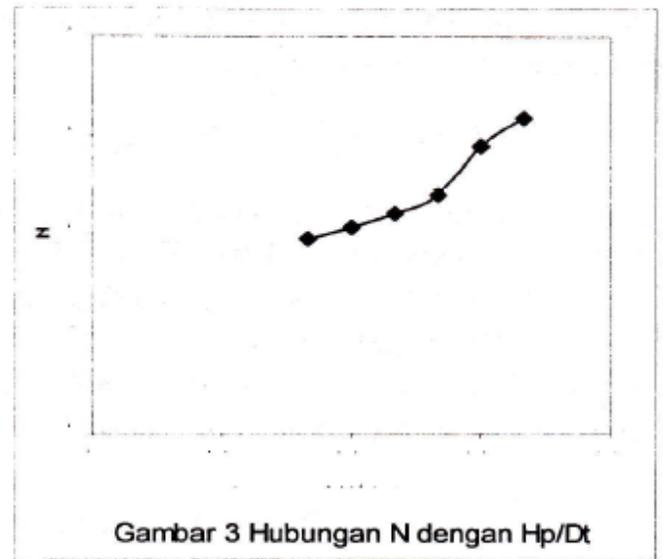
Gambar 2 Hubungan N dengan Bilangan Reynolds

Pengaruh perbandingan jarak antar sekat dengan diameter pengaduk.

Daftar II dan gambar 3 menunjukkan bahwa semakin panjang jarak antar sekat,

Daftar II Pengaruh perbandingan jarak antar sekat dengan diameter pengaduk

Hp, cm	$\frac{Hp}{Dt}$	$\frac{D}{uL}$	Bo	N
7,5	0,5	0,4054	2,4667	1,96
9,0	0,6	0,3692	2,7085	2,06
10,5	0,7	0,3291	3,0385	2,21
12,0	0,8	0,2866	3,4891	2,41
13,5	0,9	0,2206	4,5331	2,89
15,0	1,0	0,1946	5,1387	3,18



Gambar 3 Hubungan N dengan Hp/Dt

nilai N makin banyak dan bilangan Bodenstein makin besar pula tetapi bilangan dispersi makin kecil sehingga reaktor lebih mendekati ke reaktor PF. Pada $Hp/Dt = 0,5$ nilai bilangan dispersi $D/uL = 0,4054$ dan $N = 1,96$ (dibulatkan $N = 2$), sedang pada $Hp/Dt = 1$ nilai bilangan dispersi turun menjadi $D/uL = 0,1946$ tetapi nilai N naik menjadi 3,18. (dibulatkan $N = 3$). Pada $Hp/Dt = 1$ volume tiap *cascade* sama dengan volume tangki dengan ukuran panjang sama dengan diameter ($L/D = 1$). Oleh sebab itu pencampuran di tiap *cascade* akan menjadi lebih sempurna dan pencampuran kembali (*back mixing*) antar *cascade* menjadi kecil. Meskipun penyimpangannya dari sifat PF masih cukup besar, nilai $N = 3$ lebih mendekati sifat PF dari pada sifat MF (Levenspiel, 1999). Pada nilai $Hp/Dt = 0,5$ jarak antar sekat semakin pendek maka volume tiap *cascade* makin kecil, sehingga kemungkinan terjadi pencampuran kembali (*back mixing*) antar *cascade* semakin besar dan nilai $N = 1,96$ (dibulatkan $N = 2$). Keadaan ini akan lebih menjauhi sifat PF dan akan lebih dekat dengan sifat MF. Oleh sebab itu jarak antar sekat dapat digunakan untuk mengatur sifat aliran mendekati PF atau MF.

Perbandingan dengan pustaka

Pada penelitian ini nilai bilangan dispersi yang dinyatakan dengan bilangan Bodenstein dan N banyaknya tangki disusun seri dicari dari data distribusi waktu tinggal, kemudian dihitung nilai varian. Nilai N dan Bo dicari dari persamaan (9)

dan (10), dan bila kedua persamaan itu digabungkan akan membentuk persamaan berikut.

$$\frac{1}{N} = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - \left(2\frac{D}{uL}\right)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{uL}{D}\right)\right) \quad (11).$$

Hasil perhitungan untuk kedua peubah yang dipelajari ditampilkan pada daftar III. Dari daftar III terlihat bahwa nilai N yang dihitung dari distribusi waktu tinggal selalu lebih kecil dibanding N dari persamaan Pawlowski (1962) dan Elgeti (1996). Perbedaan ini disebabkan kedua

pustaka itu menyederhanakan persamaan yang dijabarkan sehingga menghasilkan nilai yang kurang tepat. Akan tetapi kedua pustaka itu menyajikan persamaan empiris kaitan antara bilangan Bodenstein dengan N banyaknya RATB disusun seri dalam bentuk persamaan yang cukup sederhana yaitu persamaan (2) dan (3). Jika dengan distribusi waktu tinggal menghasilkan persamaan (11).

Daftar III Hubungan bilangan Bodenstein dengan N

$\frac{D}{uL}$	Bo	N ¹⁾	N ²⁾	N ³⁾
0,4360	2,2935	1,88	2,25	2,14
0,4285	2,3337	1,90	2,27	2,16
0,4054	2,4667	1,96	2,33	2,23
0,3727	2,6831	2,15	2,43	2,34
0,3692	2,7085	2,06	2,44	2,35
0,3291	3,0385	2,21	2,60	2,51
0,2866	3,4891	2,41	2,81	2,74
0,2762	3,6205	2,47	2,87	2,81
0,2468	4,0518	2,67	3,08	3,02
0,2206	4,5331	2,89	3,32	3,26
0,1946	5,1387	3,18	3,61	3,57
0,1834	5,4525	3,33	3,77	3,72

1) Penelitian ini (persamaan (9))

2) Pawlowski (1962) (persamaan (2))

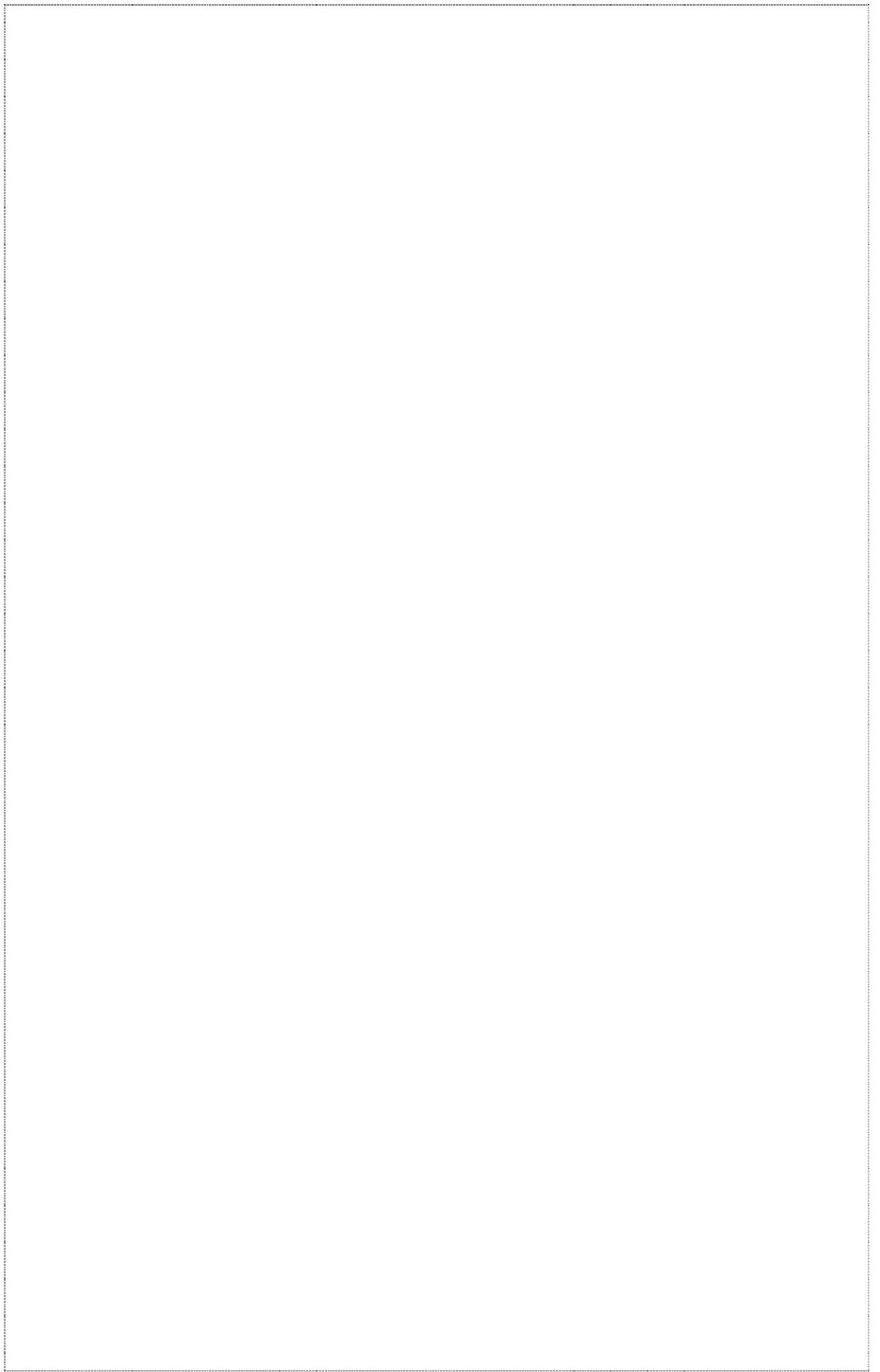
3) Elgeti (1996) (persamaan (3))

Nilai N pada persamaan (2) (Elgeti, 1996) dan nilai N dari persamaan (3) (Pawlowski, 1962) terjadi perbedaan meskipun cukup kecil. Perbedaan semakin kecil dengan semakin meningkatnya nilai N. Elgeti (1996) menjelaskan bahwa persamaan (3) akan sama dengan persamaan (2) bila nilai $N \geq 3$, sedangkan Pawlowski (1962) menjelaskan bahwa persamaan (3) berlaku bila bilangan Bodenstein, $Bo \geq 8$ atau nilai $N \geq 4$ sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan pada daftar III cukup sesuai dengan pernyataan tersebut.

Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Semakin besar kecepatan putar pengaduk, nilai N yaitu banyaknya reaktor semakin kecil dan bilangan Bodenstein semakin kecil pula. Akan tetapi setelah putaran pengaduk 360 rpm ($Re = 33750$) nilai N hampir tetap dengan kenaikan putaran pengaduk.
2. Semakin besar perbandingan jarak sekat terhadap diameter reaktor, nilai N semakin kecil dan bilangan Bodenstein semakin kecil. Pengaruh perbandingan jarak sekat, $H_p/D_t \geq 0,8$ memberikan perubahan nilai N yang lebih nyata.
3. Besarnya kecepatan putar pengaduk dapat mempengaruhi sifat reaktor *cascade* mendekati sifat reaktor PF atau reaktor MF.
4. Sifat reaktor *cascade* akan mendekati reaktor PF atau MF dapat pula dilakukan dengan



mengatur perbandingan jarak sekat dengan diameter reaktor.

5. Nilai N dan bilangan Bodenstein yang dicari berdasarkan data distribusi waktu tinggal sesuai dengan data di pustaka.

Daftar Lambang

Bo	=	bilangan Bodenstein (persamaan (1))
$c(t)$	=	konsentrasi <i>tracer</i> yang keluar pada saat t , g/L
C_0	=	total konsentrasi <i>tracer</i> yang dimasukkan, g/L
D	=	koefisien dispersi aksial, m^2/s
D_t	=	diameter kolom (reaktor), m
$E(t)$	=	distribusi waktu tinggal zat alir di reaktor
H_p	=	jarak antara dua sekat, m
L	=	panjang ekivalen reaktor, m
N	=	banyaknya reaktor alir tangki berpengaduk
Re	=	bilangan Reynolds.
t	=	waktu, s
t^*	=	waktu tinggal rerata, s
u	=	kecepatan linier zat alir dalam reaktor, m
σ^2	=	varian, s^2
σ_θ^2	=	varian tak berdimensi (persamaan (8))

Daftar Pustaka

Elgeti, K., 1996, A New Equation for Correlating a Pipe Flow Reactor with a Cascade Of Mixed Reactors, *Chem. Eng Sci*, 51, 5077-5080.

Fogler, H.S., 1999, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 3rd, pp 808-909, Prentice Hall International Inc, Upper Saddle River New Jersey.

Hsu, J.T. and Dranoff, J.S., 1986, On Initial Condition Problems for Reactor Dispersion Model, *Chem Eng Sci*, 41, 1930-1934.

Kemblowski, Z. and Pustelnik, P., 1988, Residence Time Distribution of Power-Law Fluid in Kenics Static mixers, *Chem Eng Sci*, 43, 473-478.

Levenspiel, O., 1999, *Chemical Reaction Engineering*, 3rd, pp 293-334, John Wiley and Sons, New York.

Missen, R.W., Mims, C.A., and Saville, B.A., 1999, *Introduction to Chemical Reaction Engineering and Kinetics*, pp 317-334, John Wiley and Sons, New York.

Nalitham, R.V. and Davies, O.L., 1987, Residence Time Distribution Studies in a Multiphase Reactor under high Temperature and Pressure Conditions, *Ind Eng Chem Res*, 26, 1059-1066.

Pawlowski, J., 1962, Reaktionsrohr mit Cellar Stromung und seine Verweilzeit-Eigenschaften *Chemie Ingr Techn*, 34, 628-631.

Sulistyo, H. dan Handayani, W.R., 1997, Unjuk Kerja Reaktor Alir Tangki Berpengaduk, *Forum Teknik*, 21, 195-209.