

# Dinamika Pusat Rotasi Fluida pada Proses Difusi Penggabungan Vorteks

Putu Wijaya Sunu

Program Studi Refrigerasi dan Tata Udara, Jurusan Teknik Mesin

Politeknik Negeri Bali

E-mail: ptbelgia@yahoo.com

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh posisi *vortex* pada pusat rotasi fluida terhadap proses difusi penggabungan *vortex*. Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen pada sebuah tangki air. *Vortex* dibangkitkan dengan menghisap fluida melalui saluran pada bagian bawah tangki dengan pompa. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak terhadap pusat rotasi yaitu 4, 6, 8, 10 cm. Data diambil dengan mengukur radius masing-masing *vortex* dan jarak kedua *vortex*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *vortex* yang berada dipusat perputaran fluida memiliki waktu difusi yang lebih panjang dibandingkan *vortex* yang eksentris dan menjadi *vortex* dominan dalam proses penggabungan. Hal ini disebabkan adanya kekekalan momentum angular dan pengaruh tegangan geser selama rotasi *vortex*. Peningkatan jarak kedua *vortex* akan menyebabkan peningkatan waktu difusi sehingga transport fenomena akan didominasi oleh proses difusi.

**Kata kunci:** Penggabungan *vortex*, waktu difusi, jarak *vortex*.

## ABSTRACT

*This research aims to analyze effect of vortex position at center of fluid gyration on diffusion process of vortex merging. This research was done experimentally in a water tank. Vortex was generated with suck fluid through a channel at underside of tank with pump. The distance of the vortex to center of gyration was varied as 4, 6, 8, 10 cm. Data taken with measuring each vortex radius and distance of vortex separation. The result of research showed that vortex residing in centered of fluid rotation has longer diffusion time compared with vortex residing eccentrically and it becomes dominant vortex in process of merging. This matter caused by existence of conservation of angular momentum and influence of shear stress during rotation of vortex. Increase of distance of vortex separation will cause increase diffusion time so that the transport phenomenon will be predominated by diffusion process.*

**Keywords:** *Vortex merging, diffusion time, vortex distance.*

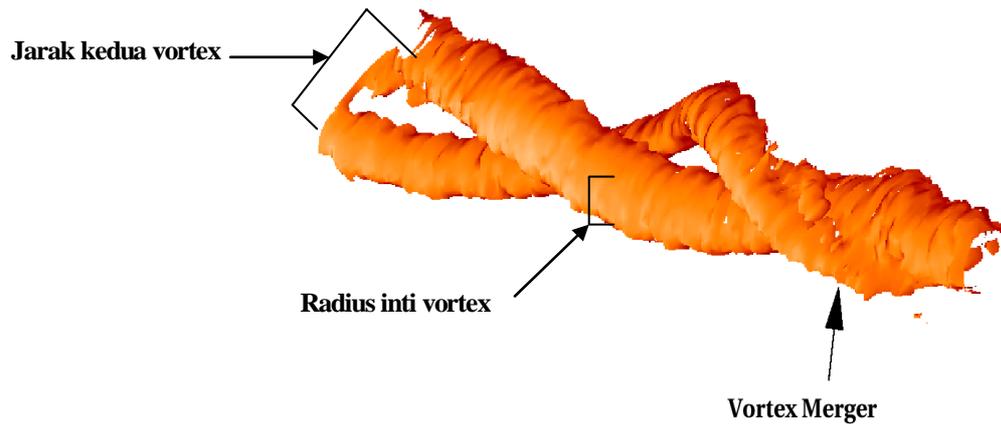
## PENDAHULUAN

*Vortex* adalah massa fluida yang partikel-partikelnya bergerak berputar dengan garis arus (*streamline*) membentuk lingkaran konsentris [1]. Gerakan *vortex* berputar disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan antar lapisan fluida yang berdekatan.

Dalam dunia industri, terbentuknya *vortex* dapat merugikan ataupun menguntungkan sesuai dengan penerapannya. Pada peralatan pemindah panas, pipa dibuat beralur sehingga terjadi beda tekanan yang selanjutnya menimbulkan *vortex*. *Vortex* akan menyapu lapisan batas sehingga jumlah panas yang dipindahkan semakin besar. Pada proses *mixing* dalam *combustor*, *vortex*

digunakan untuk mencampur reaktan sehingga diperoleh campuran yang homogen. Sedangkan pada belokan saluran *vortex* dianggap merugikan karena meningkatkan kerugian tekanan sehingga *head losses* akan semakin besar. Dalam dunia penerbangan *vortex* merupakan suatu masalah dalam kaitannya dengan keselamatan saat *landing* dan *take off*. Di bidang ilmu atmosfer *vortex* berupa *tropical cyclone* dan sangat mempengaruhi cuaca.

*Vortex* yang terbentuk pada semua proses diatas tidak hanya satu melainkan banyak, *vortex* tersebut akan berinteraksi satu sama lain kemudian bergabung (*merging*) menjadi sebuah *vortex* tunggal. Gambar 1 memperlihatkan dua buah *vortex* tunggal bergabung menjadi sebuah *vortex* tunggal.



Gambar 1. *Vortex Merging*

Penggabungan *vortex* adalah proses yang non linier yang terjadi dalam aliran dua dimensi, yang mana pada proses ini *vortex* yang berdekatan akan bergabung membentuk suatu *vortex* baru dan merupakan mekanisme utama dalam evolusi turbulensi dua dimensi [2]. Interaksi *vortex* merupakan proses yang mengandung adaptasi *vortex* pada bidang eksternal yang dihasilkan oleh *vortex* lainnya dan berhubungan dengan bentuk ketidaksimetrisan bidang *vorticity* dari tiap *vortex* [3].

Fenomena yang terjadi selama proses penggabungan meliputi proses difusi dan konveksi. Proses difusi sangat menentukan terjadinya proses konveksi. Apabila selama tahapan difusi, *vortex* tidak mampu mencapai ukuran kritis maka tahapan konveksi tidak akan terjadi begitu pula penggabungan. Yang membatasi proses difusi dan konveksi adalah nilai perbandingan radius inti *vortex* (a) terhadap jarak kedua *vortex*(b) yaitu  $a/b = 0.29$ . Nilai ini disebut sebagai ukuran kritis [4]. Oleh karena itu diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dinamika *vortex* terutama pada tahapan difusi. Salah satu perilaku yang menarik adalah bagaimana peranan *centroid* dari putaran fluida terhadap proses difusi penggabungan *vortex*.

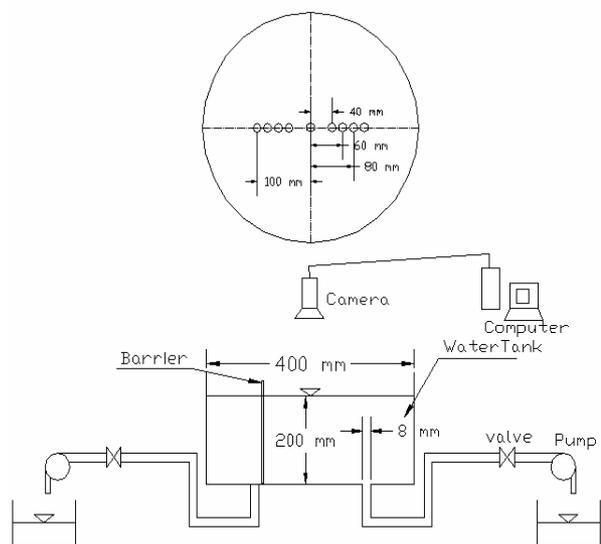
Penelitian terdahulu yang menjadi dasar kajian antara lain dilakukan oleh Cerretelli and Williamson (2003), yang mempelajari interaksi dari dua *trailing vortex* yang mana eksperimen dilakukan pada sebuah saluran, *vortex* dibangkitkan dengan melewati fluida melalui dua buah sayap pada bilangan  $Re$  400 sampai 5700. Penelitian ini mendefinisikan *phase* yang dilalui selama penggabungan dan waktu interaksi.

Yasuda and Flierl (1995), meneliti penggabungan *vortex* dua dimensi yang asimetris. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan *vorticity*, dan ukuran dari *vortex*. Dari penelitian ini diperoleh bahwa *vortex* yang dominan lebih

ditentukan oleh *vorticity* dari pada ukuran. Penelitian lain yang mendukung adalah Roberts and Christiansen (1972) dalam [4] menemukan bahwa proses penggabungan *vortex* dengan *vorticity* sama diperoleh perbandingan antara radius inti *vortex* (a) dan jarak kedua *vortex* (b)  $a/b = 0.29$ .

### METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen, dengan variabel bebasnya adalah jarak saluran pembangkitan *vortex* dengan variabel terikat adalah waktu difusi.



Gambar 2. Instalasi Penelitian

Urutan pelaksanaan pengambilan data adalah sebagai berikut: alat disetting sesuai Gambar 2. Kemudian air dimasukkan ke dalam tangki air dan diberi putaran awal. Penghalang dipasang pada posisi antara dua saluran hisap yang akan digunakan. Adapun variasi saluran yang dipakai adalah:

1. Variasi 4 yang terdiri dari perlakuan *Center-4*, 4-4, 4-6, 4-8, 4-10.
2. Variasi 6 yang terdiri dari perlakuan *Center-6*, 6-4, 6-6, 6-8, 6-10.
3. Variasi 8 yang terdiri dari perlakuan *Center-8*, 8-4, 8-6, 8-8, 8-10.
4. Variasi 10 yang terdiri dari perlakuan *Center-10*, 10-4, 10-6, 10-8, 10-10.

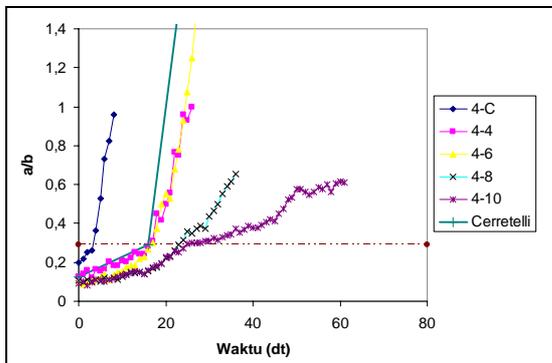
Yang dimaksud dengan variasi 4 yang terdiri dari perlakuan *center-4*, 4-4, 4-6, 4-8, dan 4-10 adalah *vortex* dibangkitkan melalui saluran yang berjarak 4 cm pada masing-masing perlakuan. Misalkan (*center-4*) merupakan perlakuan, dengan membangkitkan satu *vortex* pada pusat rotasi fluida dan satu *vortex* lagi dibangkitkan pada jarak 4 cm dari pusat rotasi fluida, begitu pula variasi lainnya.

Kemudian kedua pompa dihidupkan. Akibat adanya hisapan maka pada kedua lubang saluran akan terbentuk *vortex*. Saat ketinggian air mencapai 100 mm, *valve* ditutup bersamaan dengan menetes *vortex* dengan tinta agar nampakkan lebih jelas begitu juga penghalang diangkat secara perlahan. Pengambilan data dilakukan dengan merekam menggunakan *handycam*. Setelah itu dimensi *vortex* diukur. Hasil pengukuran kemudian dibuatkan grafik untuk mengetahui hubungannya dengan waktu difusi.

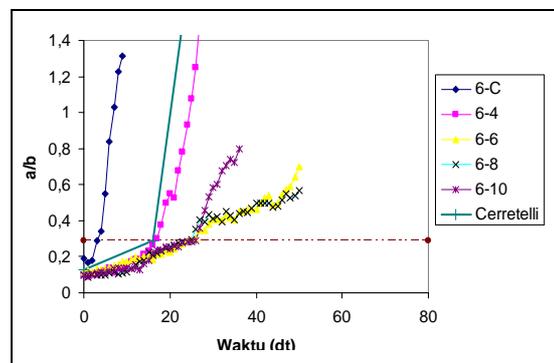
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran dibuatkan grafik untuk menunjukkan hubungan perbandingan radius inti *vortex* (a) dengan jarak kedua *vortex* (b) sebagai fungsi waktu (dt).

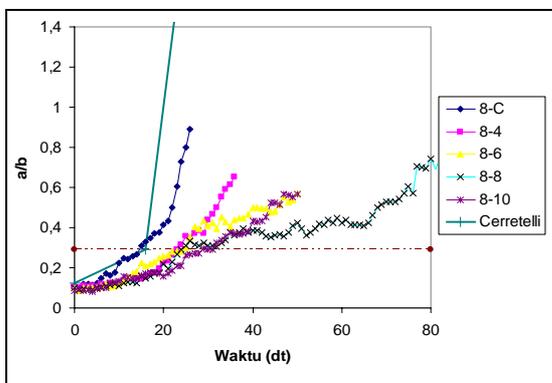
Waktu difusi adalah waktu yang dibutuhkan oleh *vortex* untuk tumbuh dari ukuran awal sampai ukuran kritis yaitu saat nilai perbandingan  $a/b=0.29$  (garis putus-putus pada grafik). Pada setiap variasi, semakin besar jarak awal kedua *vortex* maka waktu difusi akan semakin panjang. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut, apabila diasumsikan laju pertumbuhan *vortex*  $a(t)$  sama untuk setiap perlakuan maka dengan meningkatnya jarak kedua *vortex* (b) maka nilai  $a/b$  akan semakin kecil sehingga diperlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai nilai  $a/b=0.29$ . Perubahan nilai  $a/b(t)$  adalah linier (regresi) baik pada proses difusi maupun proses konveksi. Perbedaan kedua proses ini adalah tingkat kemiringan garisnya. Proses difusi terjadi secara linier dengan kemiringan garis yang kecil. Dalam hal ini *vorticity* berdifusi sehingga *vortex* mengalami perubahan radius, sedangkan jarak kedua *vortex* mengalami perubahan yang kecil. Hal ini terjadi karena *vortex* masih dalam kestabilan sehingga kemiringan garis  $a/b$  pada proses difusi kecil. Pada masing-masing variasi (4, 6,



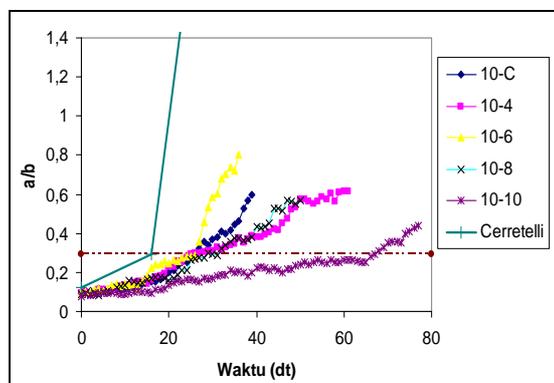
(a) Pada Variasi 4



(b) Pada Variasi 6



(c) Pada Variasi 8



(d) Pada Variasi 10

Gambar 3. Hubungan antara Perbandingan Radius Inti terhadap Jarak Kedua *Vortex* dengan Difusi Waktu

8, 10) terlihat bahwa garis proses difusi akan semakin mendekati horisontal dengan meningkatnya jarak awal kedua *vortex*.

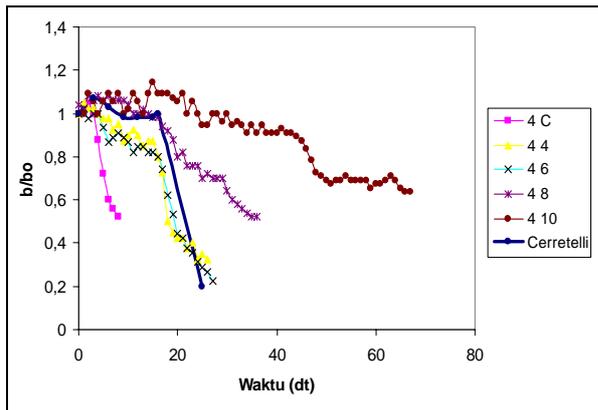
Perbandingan jarak kedua *vortex* dengan jarak awal antara kedua *vortex* ( $b/b_0$ ) sebagai fungsi waktu difusi ( $dt$ ) ditunjukkan pada Gambar 4.

Apabila dilihat antar variasi (4, 6, 8, 10) maka semakin besar variasi, garis kurva akan semakin mendatar. Hal ini disebabkan karena jarak awal kedua *vortex* yang semakin jauh. Semakin besar jarak awal kedua *vortex* maka pengaruh *vorticity vortex* satu terhadap lainnya akan semakin kecil. Pada tahapan difusi kedua *vortex* berputar pada lintasan masing-masing dan saling mengelilingi. Eksperimen terdahulu [4] membuktikan bahwa jarak kedua *vortex* akan mengalami sedikit perubahan karena *vortex* masih berada dalam kestabilan ( $a/b < 0.29$ ). Pada penelitian ini langkah difusi berakhir pada nilai  $b/b_0$  berkisar antara 1-0.7. Pada langkah konveksi jarak kedua *vortex* menurun dengan cepat, pada grafik terlihat curam. Apabila dibandingkan dengan [4] maka terlihat *trend* yang sama secara keseluruhan hanya saja pada [4]

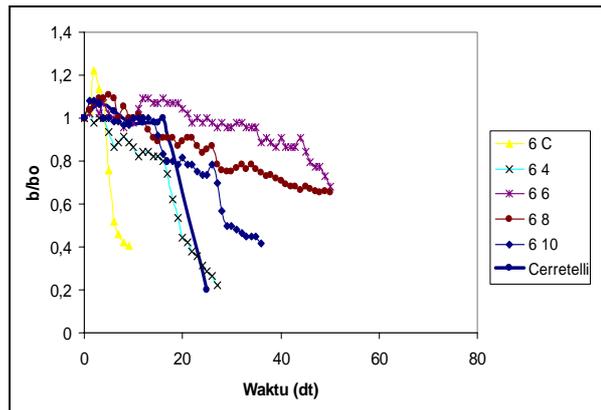
perubahan jarak kedua *vortex* lebih cepat sebab *vortex* cenderung hanyut (*convective*), dan yang paling mendekati adalah pada perlakuan 6-4.

Perubahan kuadrat dari perbandingan radius inti *vortex* terhadap jarak awal kedua *vortex* sebagai fungsi dari bilangan tak berdimensi ( $T$ ) ditunjukkan pada Gambar 5, dengan  $\nu$  adalah viscositas kinematik.

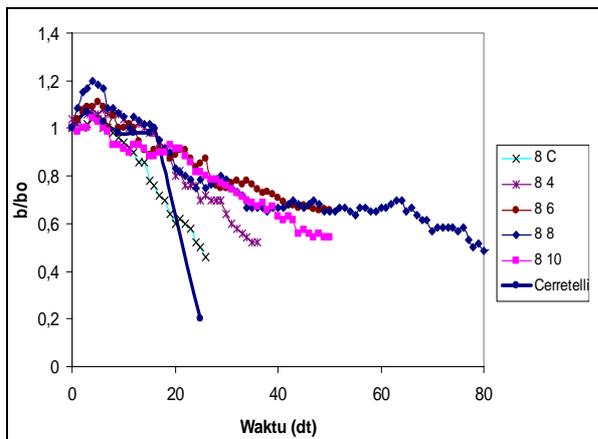
Bilangan tak berdimensi  $T$  [4] menunjukkan kemampuan *vorticity* untuk berdifusi dalam area tertentu. Besarnya kemampuan *vorticity* berdifusi sangat ditentukan oleh difusivitas momentum. Semakin besar nilai difusivitas maka kemampuan berdifusi semakin besar. Pada penelitian ini, difusivitas air adalah  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Jika ditinjau pada selang waktu yang sama pada setiap perlakuan maka semakin besar jarak awal kedua *vortex*, nilai koefisien ( $T$ ) akan semakin kecil sehingga bisa dikatakan hambatan *vortex* berdifusi semakin besar dan bila dihubungkan dengan kuadrat  $a^2/b_0^2$  (yang juga tak berdimensi) pada setiap variasi maka grafik yang dibentuk akan semakin horisontal. Hal ini disebabkan karena nilai  $b_0$  yang semakin besar.



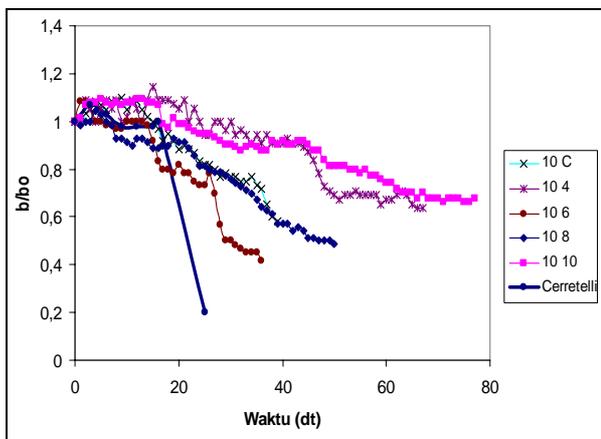
(a) Pada Variasi 4



(b) Pada Variasi 6

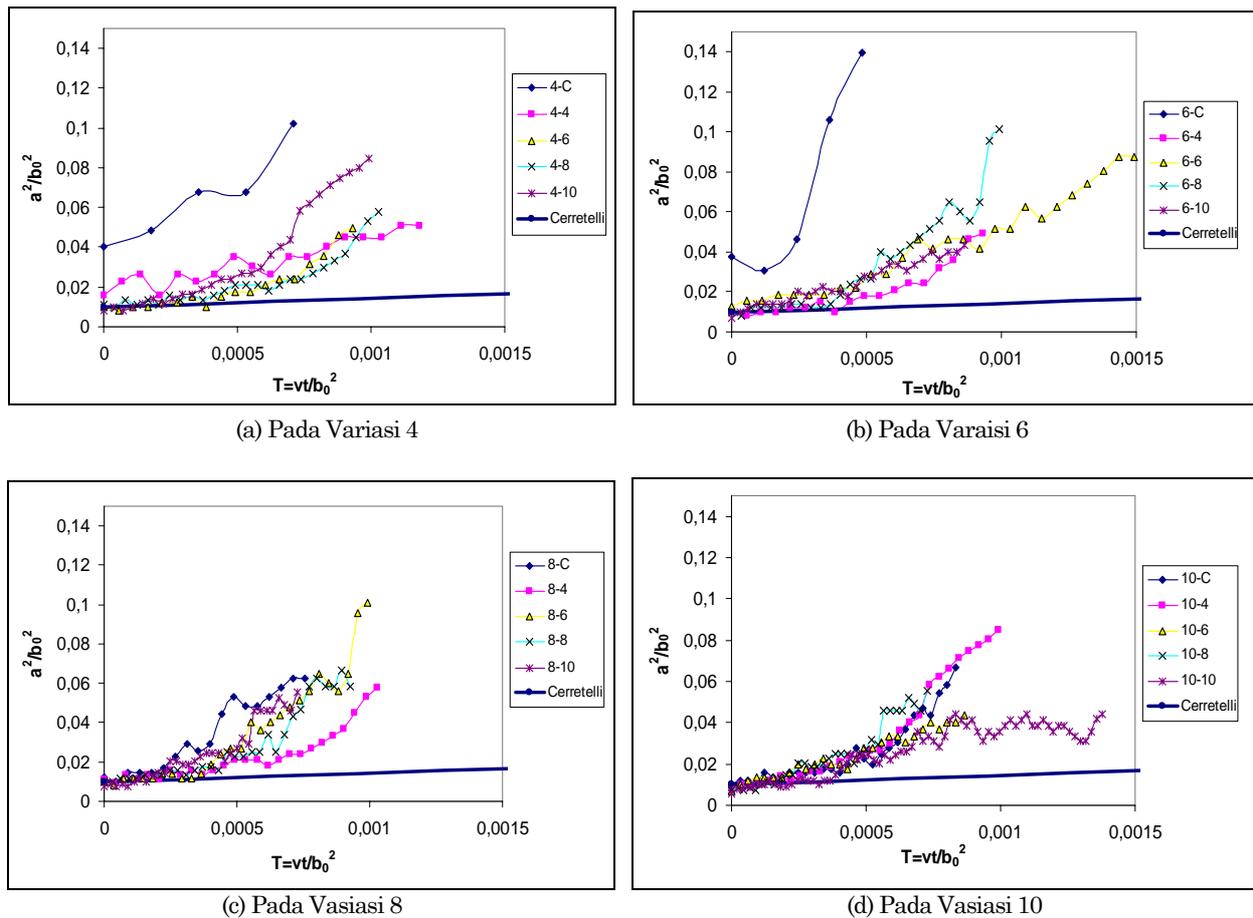


(c) Pada Variasi 8



(d) Pada Variasi 10

Gambar 4. Hubungan antara Perbandingan Jarak Kedua Vortex dengan Jarak Awal Kedua Vortex dengan Waktu Defuse



Gambar 5. Hubungan antara Perbandingan Viskositas dengan Kuadrat Jarak Awal Vortex terhadap Kuadrat Radius Inti Vortex

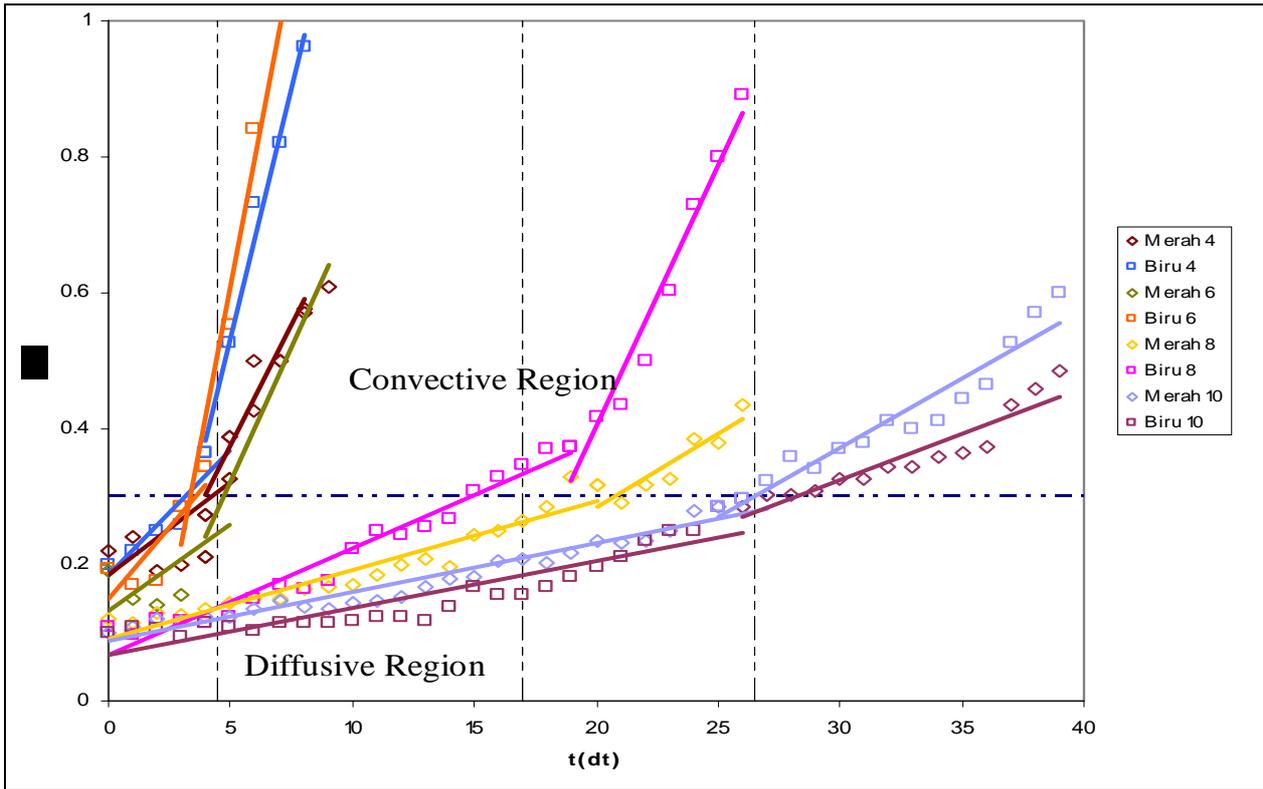
Bila dibandingkan dengan hasil penelitian [4] maka terlihat *trend* yang sama. Dari grafik ini juga terlihat bahwa nilai koefisien (T) pada penelitian ini lebih kecil dari [4]. Hal ini disebabkan oleh jarak awal kedua *vortex* ( $b_0$ ) yang lebih besar sehingga dapat dikatakan bahwa jarak kedua *vortex* adalah faktor penghambat selama proses *merging*. Sedangkan nilai perbandingan  $a^2/b_0^2$  pada penelitian ini lebih besar dibanding [4]. Hal ini disebabkan oleh nilai radius awal *vortex* pada penelitian ini lebih besar dibanding [4].

Dalam penelitian ini juga menganalisis peran *vortex* yang berada pada pusat rotasi fluida terhadap waktu difusi penggabungan *vortex*.

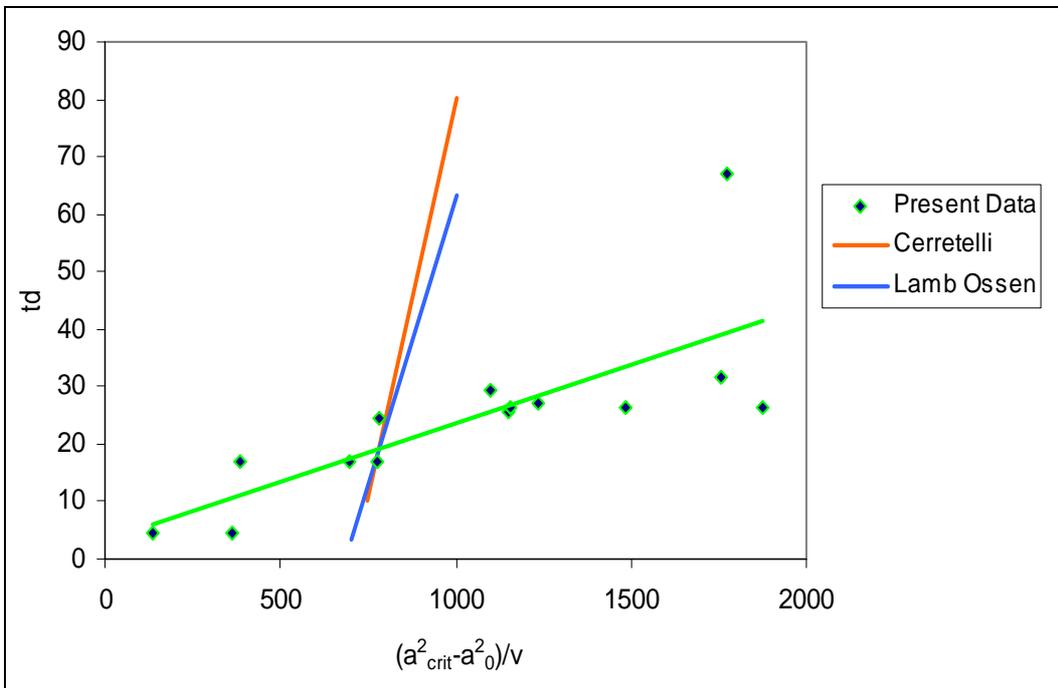
Data pada Gambar 6 diperoleh dengan meletakkan *vortex* merah pada center dan *vortex* biru berjarak tertentu (eksentris) dari pusat. Pada perlakuan *Center-4*, *Center-6*, *Center-8*, *Center-10* waktu difusi rata-rata semakin panjang yaitu 4.5, 4.5, 17, 26.5 detik.

Gambar 6 menunjukkan bagaimana pengaruh *vortex* yang berada pada *center* rotasi terhadap proses difusi penggabungan *vortex*. Proses difusi berlangsung pada daerah dibawah garis putus-putus ( $a/b=0.29$ ) secara linier pada semua grafik. Perbedaan proses difusi adalah terlatak pada

kemiringan garis. Semakin pendek waktu difusi maka garis akan semakin curam. Pada proses ini, *vortex* yang berada di *center* (merah) akan mengalami waktu difusi lebih panjang dibandingkan *vortex* biru yang eksentris terhadap pusat. Saat *merging*, *vortex* merah adalah *vortex* yang dominan sedangkan *vortex* biru akan mengalami regangan menjadi filamen panjang. Hal ini bisa dijelaskan sebagai berikut, sesuai dengan hukum kekekalan momentum angular maka *vortex* biru akan tertarik ke pusat rotasi. Selama perjalanannya menuju pusat maka kecepatan putar *vortex* akan meningkat, hal ini juga akan meningkatkan tegangan geser. Untuk mengimbangi tegangan geser maka *vorticity* didifusikan ke lingkungan sehingga dimensi *vortex* semakin besar. Hal ini menyebabkan *vortex* biru menjadi tidak stabil lebih dahulu dibandingkan dengan *vortex* merah. Kemudian proses konveksi dimulai dengan *vortex* yang meregang membentuk filamen. Tujuannya adalah untuk menurunkan kecepatan putar *vortex*. Peregangan ini dibatasi oleh viskositas fluida sehingga pada jarak tertentu dari pusat, *vortex* biru hancur dan akan terserap oleh medan *vorticity* *vortex* merah yang lebih stabil.



Gambar 6. Hubungan antara Waktu Difusi dengan Perbandingan Radius Inti terhadap Jarak Separasi



Gambar 7. Hubungan antara Perbandingan Radius Kritis terhadap Difusivitas Momentum dengan Waktu Difusi

Gambar 6 tersebut terbagi atas dua area yaitu daerah difusif dan daerah konvektif. Daerah difusi adalah daerah yang terletak dibawah garis  $a/b= 0.29$  sedangkan daerah konveksi adalah daerah yang terletak diatas garis  $a/b= 0.29$ . Dari gambar 6, terlihat bahwa semakin dekat jarak *vortex* ke pusat rotasi maka waktu difusi semakin pendek sedang waktu konveksi akan semakin panjang begitu juga sebaliknya. Selama proses difusi *vortex* hanya menyebar (berdifusi) sedangkan jarak kedua *vortex* sedikit mengalami perubahan. Dalam fenomena transport proses difusi dan konveksi selalu bergandengan.

Dari penelitian ini didapat, apabila fenomena penggabungan *vortex* diterapkan untuk transport fenomena maka semakin besar jarak kedua *vortex*, transport yang terjadi didominasi oleh peristiwa difusi dan apabila jarak kedua *vortex* semakin kecil maka akan didominasi oleh konveksi.

Secara keseluruhan dari hasil penelitian ini dapat dicari hubungan antara radius kritis *vortex*, radius awal dan difusivitas fluida terhadap waktu difusi.

Gambar 7 merupakan data eksperimen secara keseluruhan yang diregresi untuk dapat digunakan memprediksi waktu difusi sebagai fungsi dari radius kritis, radius awal dan difusivitas momentum. Kuadrat radius kritis dikurangi kuadrat radius awal merupakan daerah luasan difusi *vortex*, jadi dapat dikatakan sebagai difusivitas massa selama selang waktu tertentu. Sehingga pada sumbu mendatar adalah perbandingan antara difusivitas massa dengan diffusivitas momentum. Waktu difusi tergantung pada nilai perbandingan ini tetapi tidak tergantung kekuatan *vortex*. Semakin besar kekuatan *vortex*, *vorticity* akan semakin besar sehingga bilangan Reynold semakin besar berdasarkan penelitian terdahulu [4] maka jumlah *vortex* mengelilingi satu sama lain akan bertambah dalam selang waktu difusi. Jadi kekuatan *vortex* tidak mempengaruhi waktu difusi. Secara sederhana waktu difusi dapat dirumuskan sebagai berikut [4]:

$$t_D = \frac{1}{c^2\nu} (a_{crit}^2 - a_0^2) + c_1 \quad (1)$$

Pada penelitian sebelumnya nilai koefisien  $c$  dijadikan sebagai patokan untuk membandingkan proses difusi. Penelitian yang dilakukan oleh [4]

menghasilkan nilai  $c=1.9$  dan oleh Lamb Oseen dalam [4]  $c=2.24$ . Sedangkan pada penelitian ini didapat nilai koefisien  $c=7.0$ . Dari grafik terlihat semakin besar nilai  $c$  maka semakin kecil sudut kemiringan garis yang dibentuk, begitu juga waktu difusi akan semakin pendek. Disini juga dapat dilihat perbedaan antara *vortex* dalam saluran [4] dan *vortex* pada fluida yang berputar. Pada fluida berputar proses difusi sangat kuat sehingga waktu difusi akan lebih pendek.

## KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa pada proses difusi penggabungan *vortex* pada fluida berputar akan didapat hasil sebagai berikut:

Proses difusi dalam penggabungan *vortex* berlangsung linier. *Vortex* yang berada di pusat (*center*) perputaran fluida akan memiliki waktu difusi yang lebih panjang dibandingkan dengan *vortex* yang eksentris terhadap pusat dan menjadi *vortex* yang dominan dalam proses penggabungan. Meningkatnya jarak kedua *vortex* akan menyebabkan meningkatnya waktu difusi sehingga transport fenomena yang terjadi akan didominasi proses difusi. Sedangkan apabila jarak kedua *vortex* semakin kecil maka waktu difusi akan semakin pendek dan fenomena transport akan didominasi oleh proses konveksi.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Robenson J. A and Crowe C.T., *Engineering Fluid Mechanics*, Sixth Edition, John Willey& Son, Inc., New York 1997.
2. Yasuda I. and Flierl G.R., "Two-Dimensional Asymmetric Vortex Merger: Contour Dynamics Experiment", *Journal of Oceanography* Vol. 51, 1995, pp. 145-170.
3. Legras B., Dritschel D. and Caillol P., "The Erosion of a Distributed Two-Dimensional Vortex in a Background Straining Flow", *J. Fluid Mech.* Vol. 441, 2001, pp. 369-398.
4. Cerretelli C. and Williamson C.H.K., "The Physical Mechanism for Vortex Merging", *J. Fluid Mech.* Vol. 475, 2003, pp. 41-77.
5. Fox R.W. and McDonald A.T., *Introduction of Fluid Mechanics*, Third Edition, John Willey& Son, Inc, New York, 1985.