

Karakteristik Resistensi Kelompok Pulau di Sungai

Agus Maryono

Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta, 55128, E-mail: agusmaryono@yahoo.com

Abstrak

Pada proyek renaturalisasi sungai, sering dibangun pulau-pulau secara individu ataupun berkelompok dengan formasi tertentu. Banyak kelompok pulau buatan yang dibangun mengalami kegagalan karena rusak atau tererosi oleh aliran air. Kegagalan ini bisa disebabkan kurangnya informasi dan pengetahuan tentang karakteristik resisten kelompok pulau. Oleh karena itu karakteristik formasi kelompok pulau yang mempunyai resistensi terhadap aliran rendah sangat penting untuk diteliti. Penelitian ini bertujuan menemukan dan mengenali karakteristik resistensi kelompok pulau di sungai dengan berbagai variasi formasi kelompok tersebut yang mempunyai resisten minimal. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium hidraulika dan aerodynamic, Theodor Rehbock, Karlsruhe Institute of Technology, Jerman (1998). Hal yang diteliti meliputi; pengaruh jarak antar pulau dan keberadaan suatu pulau terhadap resistensi pulau lainnya dan resistensi kelompok pulau dengan berbagai susunan formasinya (overlep, paralel, dan berselang-seling). Parameter tidak bebas dalam penelitian ini adalah koefisien resistensi, sedang parameter bebasnya adalah angka Froude, kedalaman relatif aliran, jarak relatif antar pulau dan formasi kelompok pulau. Penelitian ini menghasilkan informasi dalam bentuk gambar, grafik dan diagram yang menunjukkan karakteristik koefisien resistensi kelompok pulau. Hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai dasar dalam menganalisis stabilitas kelompok pulau dan sebagai dasar dalam membangun kelompok pulau di suatu sungai pada program restorasi sungai.

Kata-kata Kunci: Pulau sungai, kelompok pulau, resisten pulau.

Abstract

Islands and group of islands are often constructed in the river restoration project. Some of groups of islands are eroded by flow. It may be caused by the lack of the understanding of the islands resistant. Therefore, it is important to research the resistant characteristic of groups of islands. The main objective of this research is to find formations of groups of islands with minimum resistant. The research is conducted in the hydraulic and aerodynamic model of the Theodor Rehbock Laboratory, Karlsruhe Institute of Technology, Germany (1998) and consists of; the influence of island on the resistant of other islands, and the influence of the group of islands formations (overlap, parallel and braided) on their resistant. The dependent parameter is the drag coefficient or resistant coefficient and the independent parameters are the Froude number, the relative water depth, the relative distant between islands, and the formations of groups of islands. The research resulted figures, graphics and diagrams of the resistant characteristics of groups of islands. These results can be used as a basic consideration in analyzing the stability of groups of islands and in constructing a group of islands in a river restoration project.

Keywords: Islands, group of islands, islands resistant.

1. Pendahuluan

Setelah periode pembangunan sungai yang salah satunya ditandai dengan pelurusan-pelurusan sungai abad 18 sampai dengan 20 (**Gambar 1a**), dewasa ini berkembang upaya restorasi sungai yang diantaranya dengan membelok-belokan sungai kembali, menanam vegetasi pinggir sungai dan membangun pulau-pulau di sungai (**Gambar 1b dan 1c**).

Dengan semakin berkembangnya proyek-proyek renaturalisasi sungai di dunia, maka permintaan untuk

membangun pulau di sungai baik pulau tunggal atau kelompok pulau (lebih dari satu pulau) semakin meningkat (**Gambar 1b dan 1c**). Namun pengalaman menunjukkan bahwa beberapa kelompok pulau yang dibuat pada proyek renaturalisasi sungai mengalami erosi (**Gambar 1c**) yang diprediksi disebabkan oleh resistensi kelompok pulau yang tinggi, sehingga kelompok pulau tersebut tidak dapat bertahan lama (Dittrich, 1999). Resistensi kelompok pulau yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya kenaikan muka air, kenaikan kecepatan air dan loncatan hidrolis (*hydraulic jump*) yang dapat mengerosi pulau tersebut.

Oleh karena itu perlu diketahui formasi susunan kelompok pulau yang mempunyai koefisien resistensi yang rendah yang juga berarti mempunyai daya tahan terhadap aliran tinggi. Sebagai contoh adalah kelompok pulau yang dibangun di sungai Enz, Stuttgart Jerman (**Gambar 1b** dan **1c**) yang tererosi karena kenaikan debit dan kecepatan aliran sungai.

Dengan latar belakang tersebut, maka diperlukan penelitian resistensi kelompok pulau di sungai. Penelitian kelompok pulau di sungai diawali dengan penelitian konfigurasi kelompok pulau sungai alamiah dari peta-peta dan gambar-gambar pulau dari literatur. Kemudian dilanjutkan dengan penelitian menggunakan model pulau di laboratorium dengan model *hydraulic* (air sebagai media) dan *aerodynamic* (udara sebagai media) untuk mengetahui perilaku resistensi kelompok pulau dan perubahan arah aliran melewati kelompok pulau dengan variasi jumlah pulau dan formasi susunan pulau yang berbeda-beda. Hal yang diteliti meliputi; pengaruh jarak antar pulau dan keberadaan suatu pulau terhadap resistensi pulau lainnya dan resistensi kelompok pulau dengan berbagai susunan formasinya (overlep, paralel, dan berselang-seling). Sebagai parameter tidak bebas dalam penelitian ini adalah koefisien resisten (C_D), sedang parameter bebasnya adalah angka Froude ($Fr = V/\sqrt{(gy)}$; V = kecepatan aliran, g = gravitasi, dan y = kedalaman air), kedalaman relatif air (y/h_{pulau} ; y = kedalaman air dan h_{pulau} = tinggi pulau), jarak relatif antar pulau (x/b ; x = jarak antar pulau dan b = lebar pulau), dan formasi kelompok pulau.

Tujuan akhir penelitian ini adalah mengetahui formasi kelompok pulau yang lazim ditemukan di lingkungan sungai alamiah dan menemukan serta mengenali

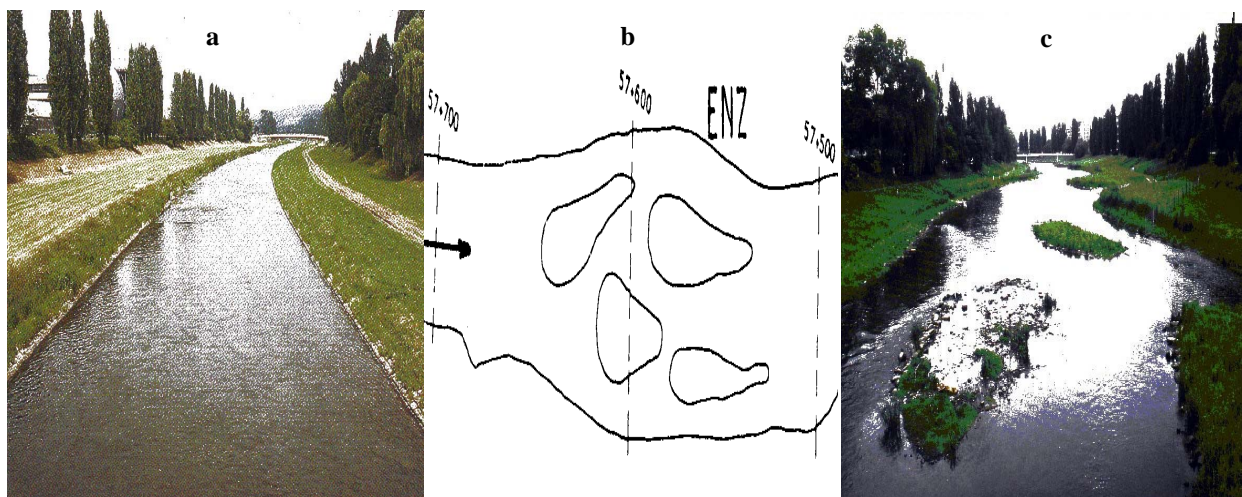
karakteristik koefisien resistensi kelompok pulau, baik pengaruh satu pulau terhadap resistensi pulau lainnya maupun resistensi kelompok pulau dengan berbagai formasi. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa keberadaan pulau di dekat pulau lainnya mempunyai pengaruh terhadap resistensi pulau yang bersangkutan, dan kelompok pulau dengan formasi seperti formasi alamiah (overlep, segaris depan-belakang dan berselang-seling) mempunyai resistensi rendah. Perilaku resistensi kelompok pulau ini selanjutnya dapat digunakan sebagai acuan dalam menganalisis stabilitas kelompok pulau yang ada di sungai dan dalam membuat desain perencanaan pembuatan kelompok pulau pada proyek restorasi sungai.

2. Landasan Teori dan Metodologi Penelitian

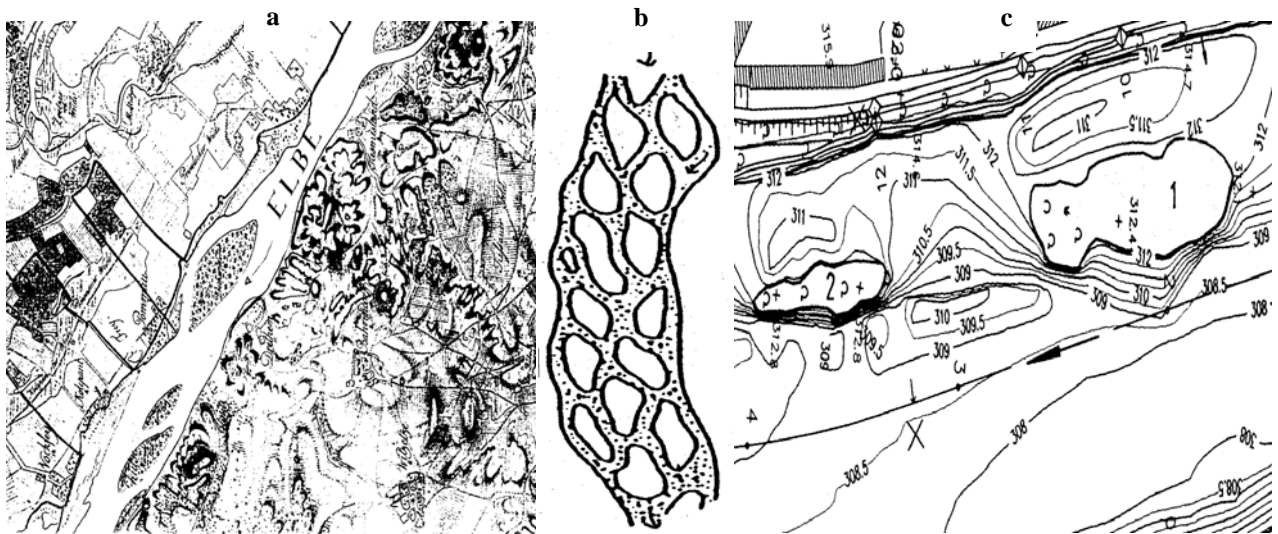
2.1 Formasi susunan kelompok pulau

Penelitian karakteristik kelompok pulau dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis data foto kelompok pulau, foto citra satelit dan gambar-gambar dari literatur. Formasi kelompok pulau yang didapat dari gambar dan foto tersebut dipakai sebagai dasar dan arah dalam penelitian formasi kelompok pulau. Di bawah ini disajikan beberapa gambar kelompok pulau.

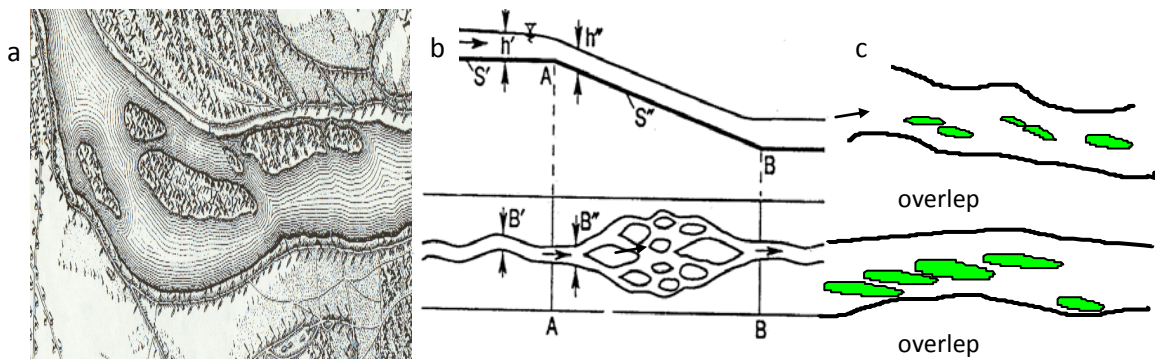
Kelompok pulau pada umumnya mempunyai konfigurasi overlep, berselang-seling dan segaris depan-belakang, sedang geometri pulau tunggal pada umumnya berupa *streamline* (Kellerhals, 1976, **Gambar 2** dan **3**). Kelompok pulau pada **Gambar 1b** dan **1c** menunjukkan bahwa kelompok pulau yang tidak mempunyai konfigurasi alamiah akan mudah tererosi oleh aliran air.



Gambar 1. a) Pelurusan sungai dari abad 18, sebelum direstorasi b) Desain restorasi dengan formasi kelompok pulau buatan, dan c) Restorasi sungai 1990 dengan kelompok pulau buatan yang tererosi 1993 (sungai Enz, Stuttgart, Jerman, Dittrich, 1999)



Gambar 2. a) Kelompok pulau alamiah di sungai Elba, Jerman, konfigurasi overlap (Haasische Militaerkarte, 1788-1804), b) Kelompok pulau dengan formasi berselang-seling (Kellerhal, 1976), c) Kelompok pulau di sungai Aare, Jerman. dengan formasi segaris muka belakang (Maryono dan Nestmann, 1998)



Gambar 3. a) Kelompok pulau di sungai Rhine, Jerman, konfigurasi overlap dan berselang-seling, geometri pulauanya berupa streamline (Haasische Militaerkarte, 1788-1804), b) Kelompok pulau berselang-seling (Yalin, 1977), dan c) Kelompok pulau dengan konfigurasi overlap (Kellerhals et al., 1976)



Gambar 4. a) Kelompok pulau di sungai Rhine, daerah Altrip, Jerman, konfigurasi overlap, sudut miring $0^\circ < \theta < 15^\circ$, geometri streamline (Haasische Militaerkarte, 1788-1804). b) Kelompok pulau di sungai Rhine, Baden, Jerman dengan konfigurasi overlap, sudut miring sekitar $0^\circ < \theta < 15^\circ$, geometri streamline (Haasische Militaerkarte, 1788-1804), dan c) Kelompok pulau buatan, konfigurasi overlap, sudut miring rata-rata sekitar $0^\circ < \theta < 15^\circ$, geometri streamline sungai Murr, Stuttgart, Jerman, dapat bertahan (Kern, 1994)

Tabel 1. Tabel uji resistensi pulau yang dipengaruhi pulau lain sesuai Gambar 5a

| No | Variasi angka Froude, (Fr) | Variasi kedalaman relatif muka air (y/h_{pulau}) | Uji resistensi pulau yang dipengaruhi 1 pulau lain di depan dan belakang serta 2 pengaruh pulau lain di depan ($x = \text{jarak antar pulau, } b = \text{lebar pulau}$) |
|----|----------------------------|---|---|
| 1 | 0,45 | 0,8 ; 1,2 ; 1,6 | $0 < x/b < 35$ (pulau uji di belakang 1 pulau lain) $0 < x/b < 20$ (pulau uji di depan 1 pulau lain) $0 < x/b < 35$ (pulau uji di belakang 2 pulau lain-simetris) |
| 2 | 0,75 | 0,8 ; 1,2 ; 1,6 | $0 < x/b < 35$ (pulau uji di belakang 1 pulau lain), $0 < x/b < 20$ (pulau uji di depan 1 pulau lain) $0 < x/b < 35$ (pulau uji di belakang 2 pulau lain-simetris) |

Tabel 2. Tabel uji resistensi kelompok pulau dengan jumlah pulau 1, 2, 3, 4, 6 dan variasi formasi kelompok pulau sesuai Gambar 5b

| No | Variasi angka Froude (Fr) | Variasi kedalaman relatif muka air (y/h_{pulau}) | Uji resistensi kelompok pulau dengan berbagai variasi dan formasi susunan kelompok pulau (Var = variasi) |
|----|---------------------------|---|--|
| 1 | 0,45 | 0,8 ; 1,2 ; 1,6; 2,0 ; 2,5 | 2 pulau dengan Var. 1 ; Var. 2 ; Var. 3 ; Var. 4 3 pulau dengan Var. 1 ; Var. 2 ; Var. 3 ; Var. 4 4 pulau dengan Var. 1 ; Var. 2 ; Var. 3 ; Var. 4 6 pulau dengan Var. 1 ; Var. 2 ; Var. 3 ; Var. 4 1 pulau tanpa variasi 2 pulau muka belakang, sudut miring $7,5^\circ$ |

Gambar 2a, 3 dan 4 adalah kelompok pulau di sungai Elba, Rhine dan Murr. Ketiga konfigurasi pulau-pulau tersebut menunjukkan konfigurasi kelompok pulau yang overlap satu dengan yang lainnya. Formasi overlap ini hampir ditemui pada setiap kelompok pulau alamiah. Di samping itu ditemukan juga bahwa beberapa formasi overlap alamiah ini mempunyai sudut miring terhadap arah datang aliran antara $0^\circ < \theta < 15^\circ$ (Gambar 4).

Kern, 1994 dan Ditrich, 1999 mengamati perkembangan pulau buatan dari tahun 1990 sampai dengan 1997 di sungai Enz (Gambar 1b dan 1c) dan Murr (Gambar 4b), Jerman. Kelompok pulau di Enz tidak stabil dan tererosi saat banjir, sedangkan kelompok pulau di sungai Murr, Stuttgart, Jerman (Gambar 4c) tidak mengalami erosi meskipun banjir sudah terjadi beberapa kali. Penyebab tidak tererosinya kelompok pulau tersebut diprediksi karena formasi kelompok pulau tersebut berupa overlap yang menghasilkan koefisien resistensi aliran rendah. Pengamatan tersebut memberikan kesimpulan sementara bahwa kelompok pulau yang tata letak konfigurasi menyerupai konfigurasi alamiah yaitu overlap, berselang-seling dan sejajar muka-belakang akan dapat lebih bertahan dari pada kelompok pulau yang tata letaknya berbeda dengan yang biasa ditemui di alam.

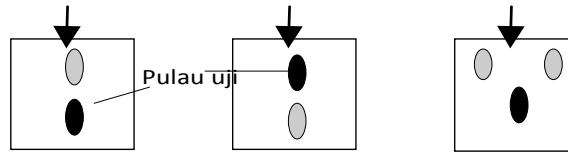
Bentuk geometri streamline pulau dan konfigurasi overlap kelompok pulau ini merupakan proses yang terus-menerus untuk mencapai kestabilan bagi masing-masing pulau dan kestabilan kelompok pulau. Bentuk overlap ini banyak ditemui di berbagai lokasi sungai

baik di daerah tropis (misal Indonesia) dan daerah dingin (Eropa). Konfigurasi segaris depan-belakang dan konfigurasi selang-seling juga banyak ditemukan di sungai. Namun frekuensi keberadaan formasi overlap lebih tinggi dari pada segaris dan berselang-seling. Sampai tulisan ini diturunkan belum terdapat penjelasan mengapa formasi overlap ini banyak ditemukan. Penelitian ini dilakukan salah satunya untuk menjawab pertanyaan tersebut.

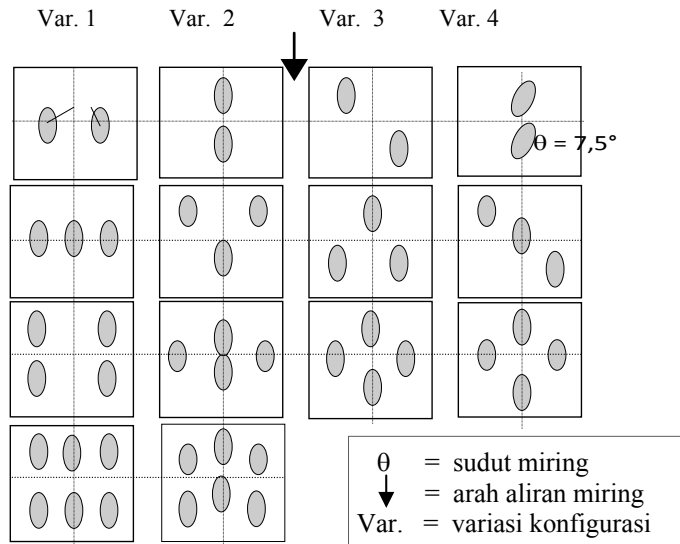
Untuk meneliti resistensi pulau yang dipengaruhi keberadaan pulau lain digunakan 2 model pulau (Gambar 5a). Sedangkan untuk meneliti resistensi kelompok pulau digunakan model pulau dengan jumlah kelompok 2, 3, 4, dan 6 pulau. Variasi formasi disesuaikan dengan jumlah pulau dalam kelompok pulau yang diteliti dan disajikan pada Gambar 5b. Penelitian resistensi kelompok pulau dilakukan dengan tiga rangkaian penelitian dengan berbagai variasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Khusus untuk susunan pulau overlap dengan 2 pulau dilakukan perubahan sudut datang aliran $7,5^\circ$. Perubahan sudut datang aliran $7,5^\circ$ ini merupakan sudut datang yang sering dijumpai di alam. Untuk menjelaskan pengaruh perubahan sudut datang (kemiringan penempatan pulau terhadap garis arah aliran) dilakukan pengujian resistensi pulau tunggal dengan sudut kemiringan $0^\circ, 7,5^\circ, 15^\circ, \text{ dan } 30^\circ$. Disamping itu dilakukan penelitian perubahan arah aliran dan perubahan dasar saluran dengan model aerodynamic yaitu menggunakan media udara dan dengan memperhatikan seluruh kesetaraan dalam pemodelan (lihat Gambar 8).

- a. Uji resistensi pulau yang dipengaruhi 1 pulau lain di depan dan belakang serta pengaruh 2 pulau lain di depan.



- b. Uji resistensi kelompok pulau dengan berbagai variasi dan formasi susunan pulauanya



Gambar 5. Variasi konfigurasi susunan kelompok pulau dalam penelitian

2.2 Model pulau

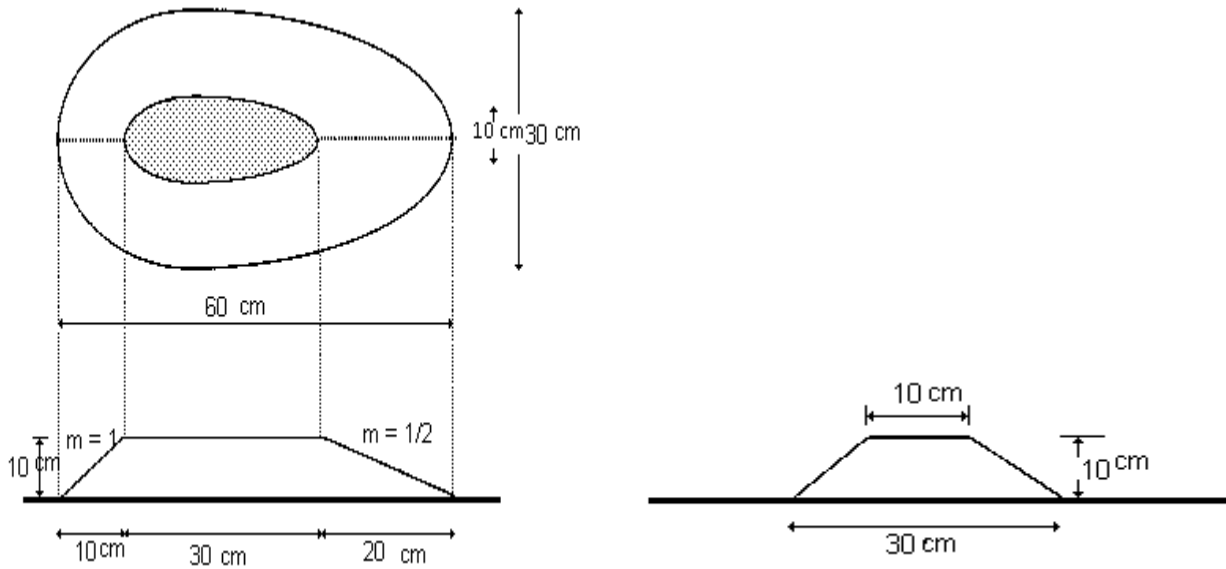
Maryono, 2008 melaporkan hasil penelitian karakteristik resistensi pulau tunggal dengan menggunakan model pulau buatan “pitched island” dari Modi, 1995 dengan bentuk dasar *streamline*. Demikian juga untuk penelitian resistensi kelompok pulau dipakai bentuk pulau dari Modi, 1995 tersebut (Gambar 6). Jumlah pulau dalam penelitian ini adalah sebanyak enam buah, hal ini mengacu pada jumlah kelompok pulau di sungai alamiah pada umumnya tidak lebih dari enam buah. Untuk penelitian kelompok pulau dengan jumlah 2-6 buah pulau, model diperkecil dengan skala 1:2, sedang untuk penelitian di saluran *aerodynamic model* diperkecil dengan skala 1:4 dan 1: 8. Berikut ini adalah gambar pulau yang digunakan dalam penelitian.

2.3 Pengukuran homogenitas saluran dan resistensi pulau

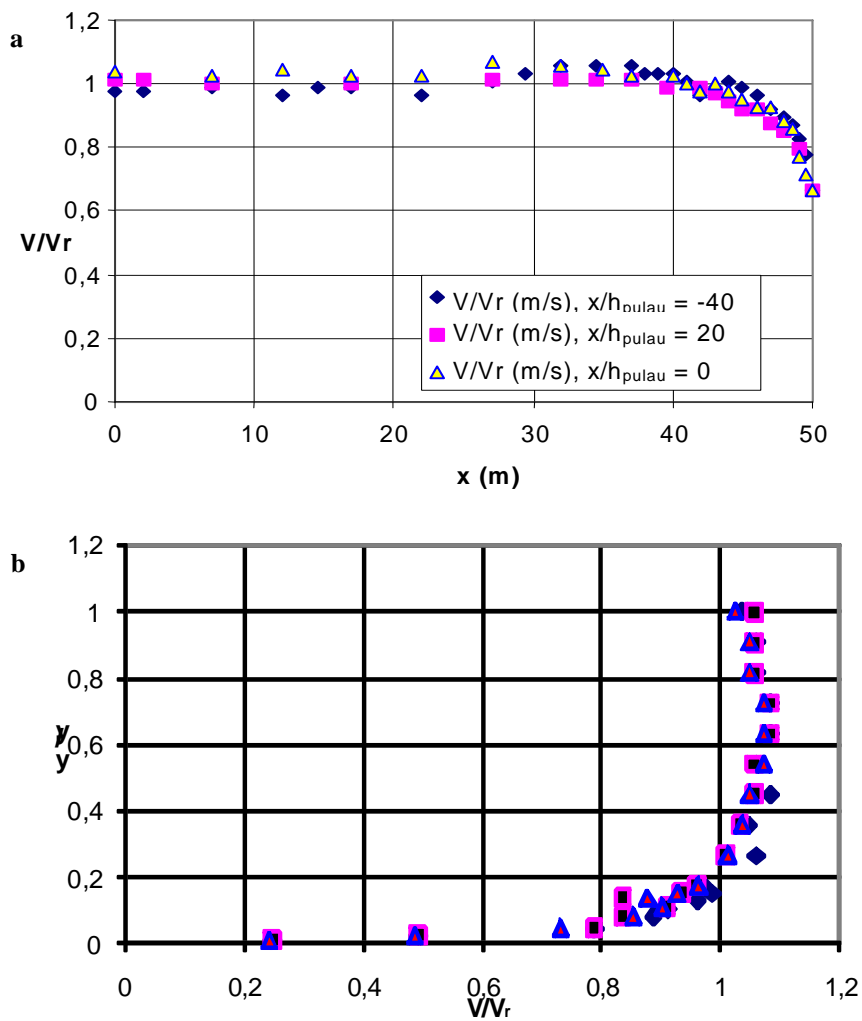
Penelitian dilakukan di Laboratorium Hidrolika Theodor Rehbock, Karlsruhe Institut of Technology (KIT), Jerman dengan menggunakan sebuah saluran terbuka (*flume*) dengan lebar 1 m, panjang 50 m dan kedalaman 40 cm. Saluran dilengkapi dengan alat pengatur debit dan pengatur kemiringan memanjang, sehingga dapat diperoleh karakteristik aliran yang

diinginkan seperti kedalaman air dan angka Froude. Penelitian dilakukan dengan parameter Fr , y/h_{pulau} , dan mengikuti variasi penelitian resistensi pulau dan kelompok pulau seperti yang disajikan pada Tabel 1, 2 dan Gambar 5. Sebelum dilaksanakan penelitian, dilakukan pengujian homogenitas saluran melalui pengukuran distribusi kecepatan horizontal dan vertikal sepanjang saluran, di bagian hulu ($x/h_{\text{pulau}} = -40$) dan bagian hilir ($x/h_{\text{pulau}} = 20$) dari lokasi pengujian ($x/h_{\text{pulau}} = 0$). Kecepatan aliran diukur dengan menggunakan *Lasser Doble Anemometer* dan pengukuran kedalaman muka air dengan *point gauge*. Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran homogenitas saluran yang digunakan.

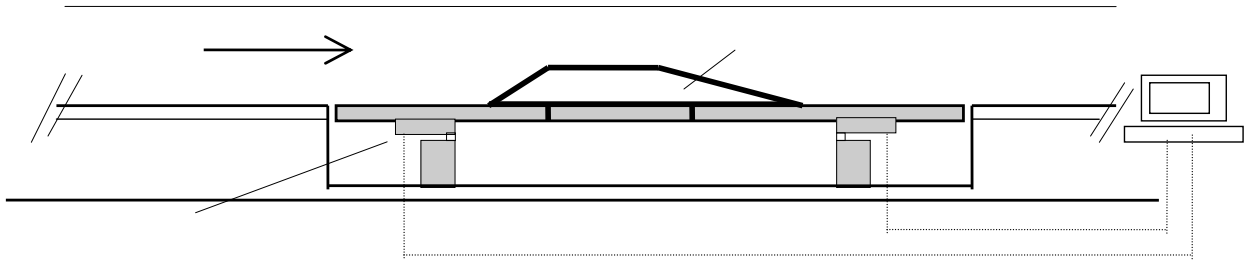
Pengukuran resistensi pulau dan kelompok pulau dilakukan dengan menggunakan alat ukur resistensi untuk suatu benda yang terkena gaya aliran yang diletakkan di dasar saluran. Prinsip kerja alat tersebut adalah prinsip gaya reaksi pegas. Benda (pulau) yang diukur tahanannya dipasang di atas papan baja yang dapat bergerak bebas horizontal dan dihubungkan dengan pegas pengukur yang tersambung dengan komputer. Reaksi yang ditimbulkan pegas merupakan gaya inerti aliran (F_D). Dengan rumus resistensi dapat diperoleh koefisien resistensi C_D (*drag coefficient*) dari benda yang diukur. Alat ukur resistensi tersebut disajikan pada Gambar 8



Gambar 6. Model pulau, dikembangkan dari model pulau dari Modi, 1995



Gambar 7. a) Distribusi kecepatan air pada saluran arah horizontal, dan b) Distribusi kecepatan vertikal pada kedalaman air $y = 10,9$ cm dan $Fr = 0,45$ (V = kecepatan lokal, V_r = kecepatan rata-rata, x = jarak pengukuran dari pulau, h_{pulau} = tinggi pulau, y' = kedalaman vertikal pengukuran, dan y = kedalaman air



Gambar 8. Sketsa alat ukur gaya inerti aliran yang bekerja pada sebuah model pulau, Laboratorium Theodor Rechbock, Karlsruhe Institut of Technology (KIT), Jerman, 1998

Adapun rumus resisten *drag coefficient* yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A_{\perp} V^2} \quad (1)$$

dengan

C_D = *drag coefficient* (-),

F_D = gaya inerti aliran yang mengenai suatu benda (pulau) searah aliran (Newton),

A_{\perp} = Luas potongan melintang benda (pulau) tegak lurus arah aliran (m^2),

V = kecepatan aliran sebelum ada benda (pulau) (m/dt),

ρ = masa jenis air (kg/m^3).

Penelitian tentang koefisien resistensi C_D yang sudah dilakukan pada obyek sejenis pulau adalah antara lain resistensi pada benda berbentuk bola, bentuk elip dan bentuk setengah bola (Gordon, 1970) dengan parameter angka Reynold dan angka Froude. Besarnya nilai *drag coefficient* disamping dipengaruhi oleh variabel-variabel di atas, juga dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti kekasaran dinding benda, bentuk geometri benda dan keberadaan benda lain di sekitar benda uji serta kondisi turbulen aliran air yang mengenai benda tersebut (Hoerner, 1965, Naudascher, 1987, Gordon et al., 1970).

Dalam penelitian resistensi kelompok pulau ini, pengaruh angka Froude dapat dikontrol dengan mengambil $Fr \leq 0,75$. Pada $0,75 < Fr < 1$ pengaruh gelombang permukaan air dominan sehingga nilai C_D tidak dapat diukur dengan akurat. Sedang pada $Fr > 1$ tidak dilakukan penelitian karena alirannya berupa super kritis yang sangat jarang ditemukan pada sungai alamiah. Pengaruh angka Reynold dapat dinetralisir dengan meneliti pada aliran turbulen, dan pengaruh kekasaran dinding ditiadakan dengan membuat model pulau halus atau dengan kekasaran yang seragam. Sedangkan pengaruh geometri dan pengaruh benda lain tidak bisa dieliminir, karena setiap perubahan geometri dan perubahan distribusi dan arah kecepatan akibat benda lain akan berakibat perubahan sebaran tekanan pada benda uji yang akan menyebabkan perubahan

angka *drag coefficient*. Pengaruh geometri, keberadaan pulau lain, dan formasi susunan pulau terhadap *drag coefficient* inilah yang akan diteliti.

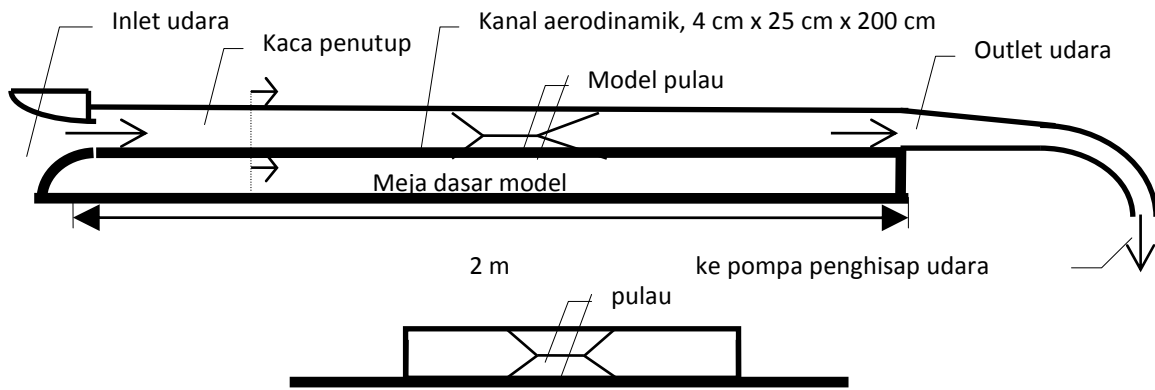
2.4 Pengukuran perubahan arah aliran dengan *aerodynamic model*

Untuk mengetahui perubahan arah aliran termasuk juga perubahan dasar sungai disekitar pulau, maka digunakan model fisik *aerodynamic*. Model ini menggunakan udara sebagai media aliran pengganti air. Dengan model ini, perubahan arah aliran dan perubahan dasar saluran akibat adanya pulau dapat digambarkan secara kualitatif. Penelitian perubahan arah aliran dengan *aerodynamic model* dilakukan pada pulau tunggal maupun kelompok pulau dengan jumlah pulau 2, 3, 4 dan 6, dengan menggunakan metode pewarnaan aliran dasar saluran. Dasar teori dan pembuatan model fisik *aerodynamic* dikembangkan dan diaplikasikan oleh Faulhaber, 1986, Nestmann dan Bachmaier, 1987 dan Maryono, 1998. **Gambar 9** menyajikan sketsa model saluran *aerodynamic*.

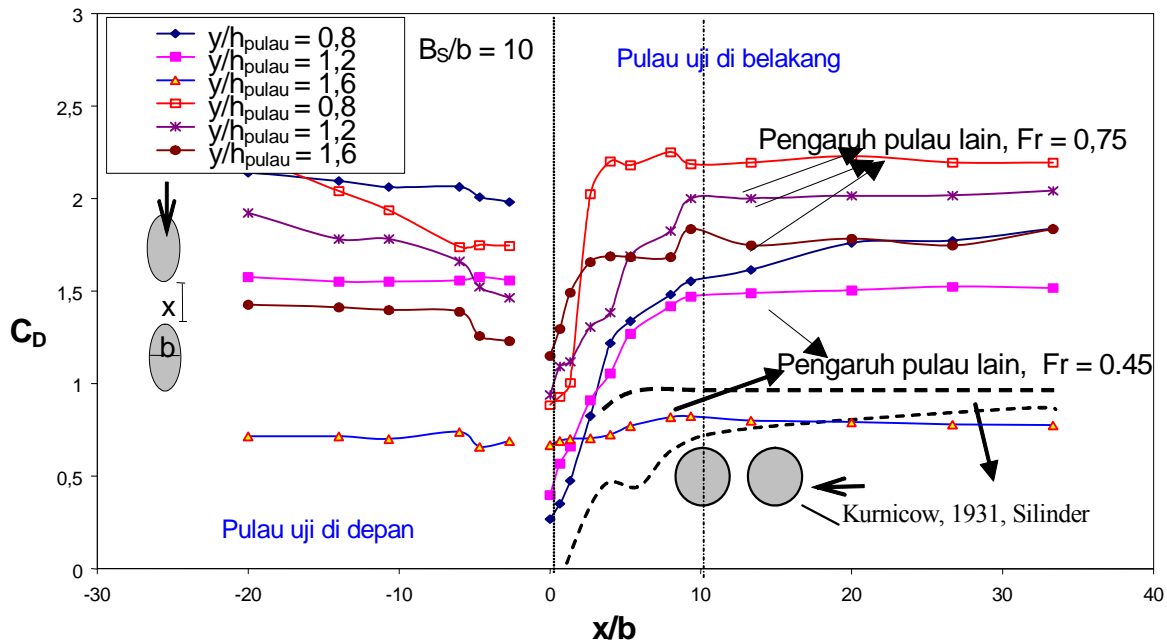
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh pulau lain terhadap resistensi suatu pulau (pulau uji)

Pengaruh pulau lain terhadap koefisien resistensi suatu pulau dapat dibandingkan dengan pengaruh selinder terhadap resistensi selinder lain yang disajikan pada **Gambar 10** (Kuzniecowa, 1931 dalam Naudascher, 1987). Pengaruh pulau terhadap resistensi pulau lainnya diteliti pada kondisi angka Froude, $Fr = 0,45$ dan angka Froude, $Fr = 0,75$, serta pada $y/h_{\text{pulau}} = 0,8, 1,2$ dan $1,6$ (**Gambar 10** dan **11**). Hasil penelitian pada angka Froude lainnya dapat diinterpolasi dari kedua hasil dari angka Froude tersebut. Hasil penelitian dua pulau depan-belakang sesuai dengan hasil penelitian silinder pada **Gambar 10**. Perbedaan antara resistensi pulau dan silinder adalah bahwa pada silinder terdapat nilai resistensi negatif, sedang pada pulau tidak terjadi. Hal ini disebabkan karena pada silinder terjadi aliran balik dari bagian belakang lebih kuat, sedang pada pulau yang sejajar dengan arah aliran, aliran balik tidak terjadi karena bentuk pulau berupa *streamline*.



Gambar 9. Sketsa saluran aerodynamic model (model pulau pada Gambar 6 digunakan dengan skala pengecilan 1:4 untuk kelompok pulau 1, 2 dan 3, dan skala pengecilan 1:8 untuk kelompok pulau 4 dan 6)



Gambar 10. Pengaruh pulau lain terhadap koefisien C_D pulau uji pada berbagai jarak relatif antar pulau (x/b), formasi sejajar dengan $Fr = 0,45; 0,75$ dan $0,8 < y/h_{pulau} < 1,6$ (x = jarak antar pulau, b = lebar pulau, B_s = lebar saluran, $B_s/b = 10$), pada $x/b > 10$ resistensi pulau uji tidak terpengaruh pulau lain. Data pada $x/b = 0$ dengan pulau uji di depan tidak diukur (kurva terputus)

Pada penelitian dengan $Fr = 0.75$, pengaruh pulau terhadap resistensi pulau lain juga lebih besar (Gambar. 10). Kurva pada pulau bagian belakang pada Fr yang besar lebih tegak dari pada angka Froude kecil ($Fr = 0.45$). Pengaruh pulau bagian belakang terhadap pulau bagian depan lebih kecil dari pada pengaruh pulau bagian depan terhadap belakang baik pada kondisi angka Froude besar maupun kecil. Hal ini disebabkan oleh adanya daerah bayangan aliran dari pulau bagian depan yang menyebabkan penurunan kecepatan dan penurunan koefisien resistensi pulau bagian belakang.

Dengan kenaikan kedalaman relatif (y/h_{pulau}), pengaruh pulau terhadap resistensi pulau lainnya menurun baik pada angka Froude rendah maupun tinggi. Semakin tinggi kedalaman relatif aliran, maka semakin kecil perbedaan resistensi antara pulau bagian depan dan belakang (Gambar 10). Pengaruh aliran balik pada bagian belakang pulau akan melemah dengan kenaikan kedalaman aliran, hal ini disebabkan karena efek aliran balik tereliminir oleh kedalaman air. Di samping itu dengan bertambahnya jarak antar pulau, pengaruhnya terhadap resistensi pulau uji semakin mengecil, dan pada $x/b > 10$, yaitu jarak antar pulau lebih dari 10 kali lebar pulau, pengaruhnya dapat diabaikan (Gambar 10).

Pengaruh pulau terhadap resistensi pulau lainnya dengan konfigurasi tidak segaris (berseling) diteliti dengan menggunakan 2 dan 3 pulau seperti pada **Gambar 11**. Hasil dari kedua penelitian ini relatif sama, bahwa dengan bertambahnya jarak (x/b) resistensi pulau uji yang ada di belakang pulau lain bertambah. Hal ini disebabkan adanya pengurangan pengaruh bayangan aliran dari pulau bagian depan terhadap pulau yang diuji. Sampai suatu jarak tertentu (x/b) yang ditandai dengan lingkaran (lihat **Gambar 11**), pengaruh dua buah pulau terhadap penurunan resistensi pulau uji lebih besar dari pada pengaruh sebuah pulau. Namun sebaliknya di atas tanda lingkaran tersebut, pengaruh dua buah pulau terhadap penurunan resistensi pulau uji di belakangnya lebih kecil dari pada pengaruh sebuah pulau. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya pengaruh aliran samping dari 2 buah pulau di depan yang mengenai pulau uji di belakangnya sehingga koefisien resistensi bertambah.

Pengaruh dari satu atau dua buah pulau terhadap resistensi pulau di belakangnya dengan formasi seperti pada **Gambar 5** tidak hanya berupa penurunan resistensi, tapi setelah pada jarak tertentu yang ditandai dengan segi empat (lihat **Gambar 11**) terjadi peningkatan resistensi pulau. Penurunan resistensi pulau disebabkan karena kedua buah pulau di depannya menghasilkan daerah bayangan aliran bagi pulau di belakangnya (pulau uji). Sedangkan peningkatan resistensi pulau disebabkan karena peningkatan kecepatan aliran di depan pulau uji (dimana pulau uji terletak pada lokasi bersatunya aliran samping dari dua buah pulau di depannya). Sehubungan dengan terbatasnya lebar saluran untuk pengujian ini, maka

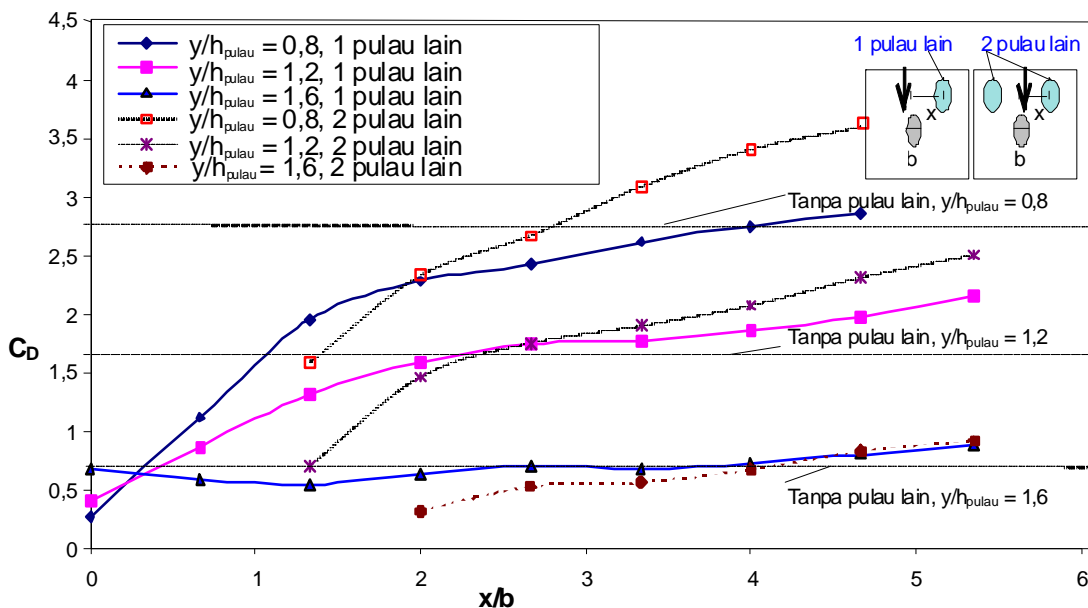
pengaruh 2 buah pulau terhadap resistensi pulau uji tidak bisa diteliti hingga mencapai kurva dengan nilai konstan dimana pengaruh kedua buah pulau tersebut dapat diabaikan.

Hasil penelitian ini menunjukkan secara jelas bahwa pengaruh pulau lain terhadap pulau uji dipengaruhi oleh jarak pulau uji tersebut terhadap pulau lain dan formasi pulau-pulau lain yang ada di sekitar pulau uji. Kondisi aliran yaitu kedalaman air relatif (y/h_{pulau}) berpengaruh signifikan pada perubahan koefisien resistensi pulau (C_D), demikian juga angka Froude (Fr).

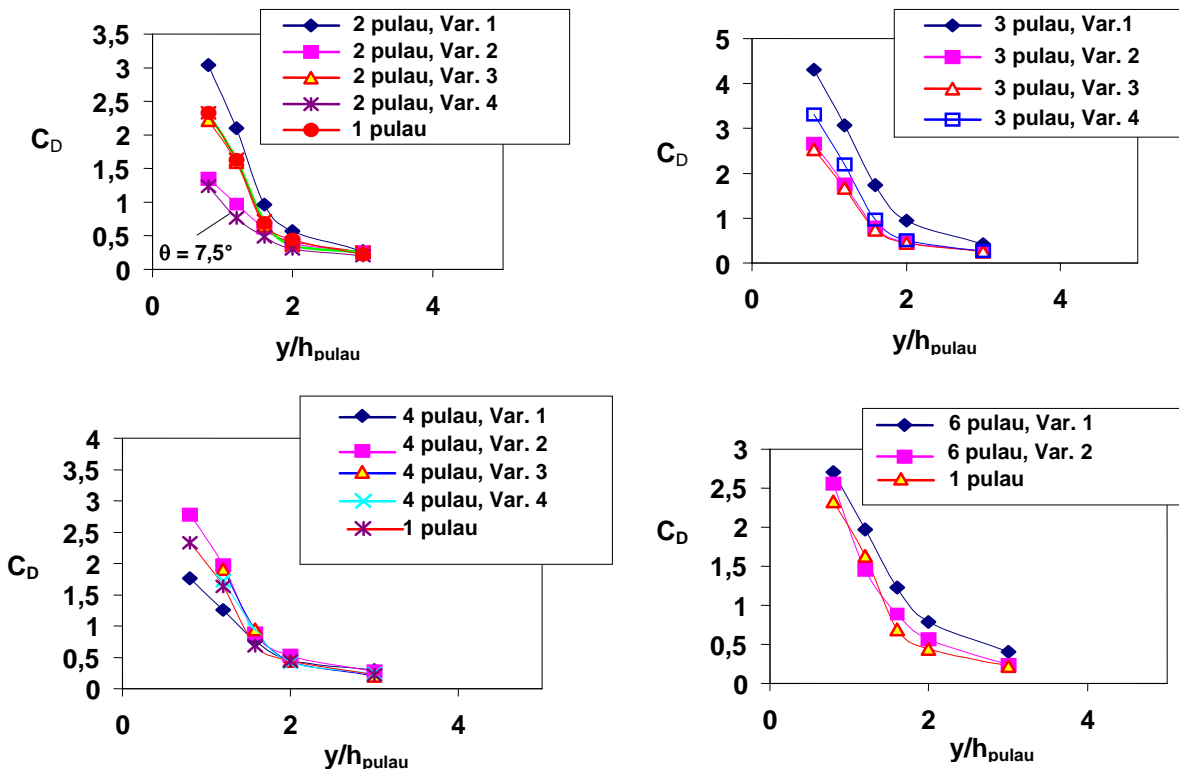
3.2 Resistensi dari kelompok pulau

Pada **Gambar 12** disajikan hasil penelitian resistensi kelompok pulau dengan variasi jumlah pulau dan variasi formasi pulau dengan faktor perubah kedalaman relatif aliran (y/h_{pulau}) dan angka Froude (Fr). Jumlah dan formasi pulau yang diteliti adalah seperti yang disajikan pada **Gambar 5**. Hasil penelitian antara lain adalah bahwa bentuk kurva resistensi (hubungan C_D , Fr dan y/h_{pulau}) dari kelompok pulau (**Gambar 5b**) mendekati bentuk kurva resistensi dari pulau tunggal atau benda bentuk setengah bola (*hemisphere*) menurut Gordon et al., 1990.

Kelompok pulau dengan formasi overlap, segaris dan berselang-seling (misalnya pada kelompok pulau dengan 2 pulau dengan variasi 2 dan 4; 3 pulau dengan variasi 2 dan 3; 4 pulau dengan variasi 1 dan 4; dan 6 pulau dengan variasi 2) menunjukkan resistensi yang lebih rendah dibandingkan dengan variasi lainnya. Hal ini dapat dijelaskan, bahwa kondisi pulau bagian belakang selalu terletak pada daerah bayangan aliran



Gambar 11. Pengaruh jarak pulau lain (x/b) terhadap resistensi pulau C_D yang diteliti pada $Fr = 0,45$ dan berbagai kedalaman relatif y/h_{pulau} (x = jarak pulau lain terhadap pulau uji, b = lebar pulau)



Gambar 12. Koefisien resistensi dari kelompok pulau dengan $Fr = 0,45$ dan berbagai variasi kelompok seperti pada Gambar 9

dari pulau didepannya dan garis-garis aliran yang terjadi sesuai dengan bentuk geometris pulau maupun bentuk formasi pulau. Koefisien resistensi pulau akan terus turun, sepanjang beberapa pulau tersebut terletak di daerah bayangan aliran dari pulau lain didepannya atau garis-garis aliran kelompok pulau tersebut simetris terhadap formasi pulau (periksa Gambar 14 e dan f).

3.3 Pengaruh sudut miring pulau (θ) terhadap resistensi pulau

Hasil penelitian pengaruh sudut miring pulau terhadap koefisien resistensi disajikan pada Gambar 13. Gambar tersebut menjelaskan bahwa penambahan kemiringan pulau dari $\theta = 0^\circ$ sampai dengan $\theta = 15^\circ$ belum menunjukkan adanya pengaruh terhadap angka C_D . Angka koefisien resistensi akan naik mulai $\theta = 15^\circ$ untuk setiap keadaan aliran. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan bertambahnya sudut miring pulau, maka luas potongan melintang pulau (A_\perp) dan gaya inerti yang mengenai pulau meningkat secara proporsional, sehingga pada $\theta < 15^\circ$ koefisien resistensi pulau relatif tidak berubah (periksa Gambar 13 dan 14 a). Dengan hasil ini, dapat dijelaskan mengapa banyak ditemukan di sungai alamiah formasi susunan pulau dan kelompok pulau yang paralel terhadap arah aliran air dengan sudut miring $0 < \theta < 15^\circ$.

3.4 Perubahan arah aliran melalui kelompok pulau

Perubahan arah aliran melalui kelompok pulau dilakukan dengan menggunakan *aerodynamic model*. Hasil penelitian disajikan pada Gambar 14.

Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan keberadaan pulau lain akan berpengaruh signifikan terhadap arah aliran di dasar saluran atau sungai, yang secara otomatis juga menyebabkan perubahan pada arah aliran di tengah dan permukaan air. Perubahan aliran pada pulau tunggal adalah bahwa terjadi aliran menyamping dengan kecepatan lebih tinggi yang ditandai dengan menipisnya pewarna pada samping pulau. Kemudian aliran kembali bertemu di belakang pulau.

Pada kelompok dengan 2 pulau terlihat bahwa pulau bagian belakang berada pada daerah bayangan aliran pulau di depannya. Jika kedua pulau dimiringkan dengan sudut sekitar $0 < \theta < 15^\circ$, akan terlihat bahwa daerah bayangan aliran bertambah (Gambar 14 a dan d). Hal ini mengindikasikan adanya penurunan koefisien resistensi pulau bagian belakang, yang berarti juga penurunan resistensi kelompok pulau keseluruhan. Pada kelompok pulau 4 dan 6 terlihat dengan jelas perubahan aliran di dasar saluran diantara pulau-pulau tersebut. Arah aliran mengikuti alur diantara pulau-pulau. Dengan formasi berselang-seling alur perubahan aliran secara kualitatif menunjukkan

perubahan yang halus tidak menimbulkan olakan atau tabrakan antar aliran. Hal ini dapat dipakai sebagai indikator adanya penurunan koefisien resistensi dan dapat menjelaskan ditemukannya formasi kelompok pulau berselang-seling di sungai alamiah. Formasi kelompok pulau tersebut setelah diuji koefisien resistensinya, menunjukkan resistensi yang rendah (lihat **Gambar 12** dan **13**). Sehingga diperoleh hasil penelitian yaitu kesesuaian antara analisis kualitatif perubahan aliran dan koefisien resistensi dengan hasil pengukuran kuantitatif koefisien resistensi kelompok pulau tersebut.

3.5 Resume hasil peneltiaan

Kelompok pulau yang tersusun berjajar ke samping mempunyai resistensi tinggi, karena setiap pulau mempunyai bidang yang terkena gaya aliran. Sedang pada kelompok pulau yang tersusun secara simetris kebelakang akan memiliki koefisien resistensi rendah, hal ini karena pulau di belakang terletak pada zone bayangan aliran.

Hasil penelitian resistensi kelompok pulau (2 pulau dengan formasi overlep) yang menarik adalah bahwa dengan melakukan perubahan sudut datang aliran sebesar $\theta = 7.5^\circ$ ($0^\circ < \theta < 15^\circ$, periksa **Gambar 4** dan **13**), pada penelitian dengan 2 pulau dan variasi 2 ternyata resistensi kelompok pulau tersebut paling rendah dibanding dengan formasi lainnya. Hal ini disebabkan karena dengan perubahan sudut terjadi peningkatan daerah bayangan aliran bagi pulau bagian belakang dan terjadi aliran balik diantara kedua pulau tersebut, sehingga resistensi kelompok pulau secara keseluruhan turun signifikan. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk menjelaskan mengapa suatu kelompok pulau buatan (misal pulau di sungai pada **Gambar 2b**, **3a**, **3b** dan **Gambar 4a**, **4b**, **4c**) relatif stabil. Hal ini karena susunan kelompok pulau tersebut adalah overlep dengan sudut miring terhadap arah aliran $0^\circ < \theta < 15^\circ$, sehingga resistensi terhadap aliran rendah.

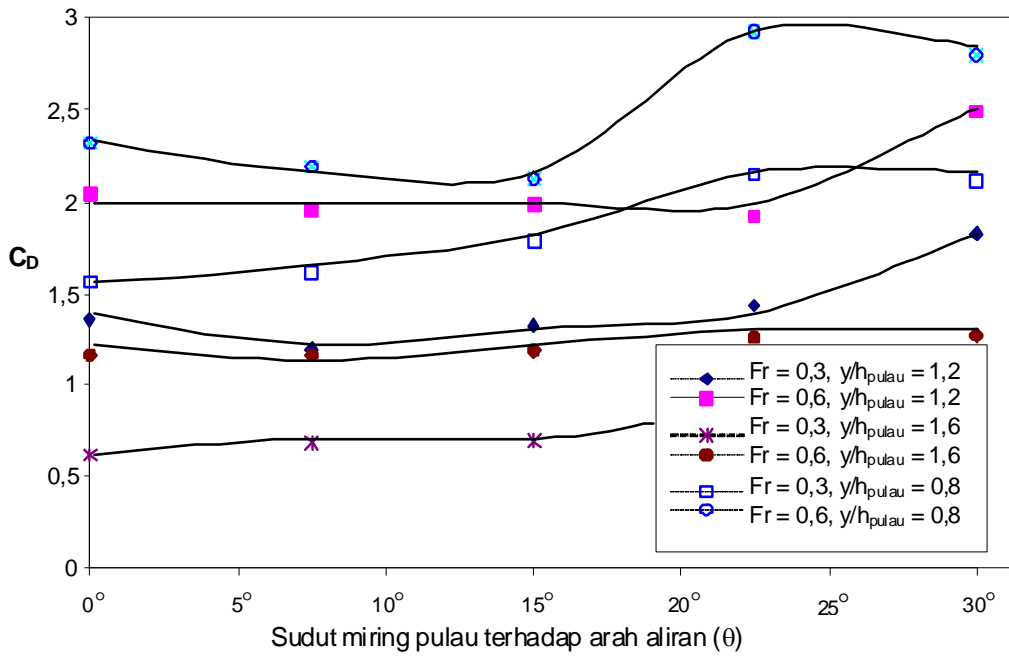
Pulau dengan susunan segaris muka belakang seperti pada **Gambar 2c** juga relatif stabil, karena pulau di belakang terletak pada bayang aliran pulau di depannya. Kelompok pulau berselang-seling dengan ruang antar pulau mencukupi (**Gambar 2b** dan **3b**) juga mempunyai resistensi rendah. Sedangkan kelompok pulau lainnya yaitu pulau buatan pada **Gambar 1b** dan **1c**, setelah adanya banjir kelompok pulau tersebut tererosi. Hal ini diprediksi karena; kelompok pulau tersebut mempunyai resistensi tinggi, disusun tidak dengan formasi berselang-seling atau overlep yang sempurna, dan lebar pulau bagian depan terlalu besar dibanding bagan belakang, sehingga aliran diantara pulau tidak teratur seperti pada **Gambar 14 e** dan **f**.

Dari penelitian di atas ditemukan bahwa formasi kelompok pulau yang menyerupai formasi kelompok pulau alamiah mempunyai resistensi yang paling minimal. Hal ini menunjukkan berlakunya prinsip resistensi minimal atau *minimum prinzipl of resistant* (Leopold, 1966). Prinsip ini menyatakan bahwa setiap struktur di alam ini dalam perkembangannya akan membentuk diri, menyesuaikan diri atau berubah kearah bentuk sruktur yang mempunyai resistensi minimal.

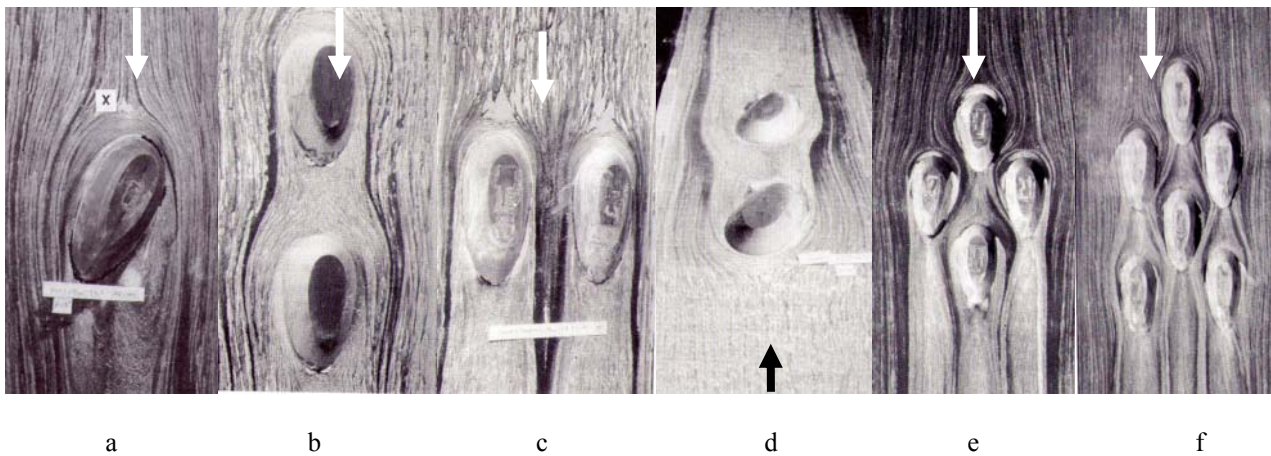
4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian tersebut di atas, dapat dipetik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi aliran yaitu angka Froude (Fr) dan kedalaman air relatif (y/h_{pulau}) mempunyai pengaruh signifikan terhadap perubahan koefisien resistensi (C_D) suatu pulau dan kelompok pulau.
2. Keberadaan pulau di depan dan di belakang dari pulau uji akan berpengaruh pada peningkatan atau penurunan resistensi pulau tersebut. Dengan bertambahnya jarak antar pulau, pengaruhnya terhadap resisten pulau uji semakin mengecil, dan pada jarak antar pulau lebih dari 10 kali lebar pulau pengaruhnya dapat diabaikan.
3. Formasi kelompok pulau yang menyerupai formasi alamiah yaitu berformasi overlep, segaris depan belakang dan selang-seling pada umumnya mempunyai resistensi aliran yang rendah. Sedangkan kelompok pulau overlep dengan kemiringan kurang lebih $7,5^\circ$ atau $0^\circ < \theta < 15^\circ$ terhadap arah aliran (formasi ini paling sering ditemukan di sungai alamiah) mempunyai nilai resistensi paling minimal. Hal ini menunjukkan berlakunya prinsip resistensi minimal (*minimum prinzipl of resistant*).
4. Hasil penelitian ini merupakan pengetahuan baru dalam bidang hidraulik persungai dan sebagai referensi pada analisis stabilitas pulau dan kelompok pulau alamiah pada sungai serta dapat digunakan sebagai referensi dalam membangun pulau dan kelompok pulau buatan pada proyek renaturalisasi sungai.



Gambar 13. Koefisien resistensi C_D sebagai fungsi sudut θ , pada $0,3 < Fr < 0,6$ dan $0,8 < y/h_{pulau} < 1,6$; pada $0 < \theta < 15^\circ$ koefisien resistensi pulau relatif konstan



Gambar 14. Hasil penelitian perubahan arah aliran melewati pulau, digambarkan dengan teknik pewarnaan dasar aliran pada aerodynamic model, a. 1 pulau miring, b. 2 pulau sejajar, c. 2 pulau bersebelahan, d. 2 pulau muka belakang dengan kemiringan, e. 4 pulau berselang-seling, dan f. 6 pulau berselang-seling

Daftar Pustaka

- Dittrich, A., 1999, *Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer* (Pengaruh Timbal Balik antara Morphologi dan Aliran pada Kondisi Wilayah Sungai yang Mendekati Alamiah), Mitteilung des Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 198.
- Faulhaber, P., 1986, *Aerodynamische Modellierung hydraulischer Abflüsse mit freier Oberfläche*, Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser-und Grundbau, Berlin.
- Gordon, et al., 1970, Free surface, velocity gradient flow past hemisphere, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 96, No. HY7, pp. 1485-1502
- Haasische Militärkarte, 1788-1804, *Vervielfältigt durch das Hessische Landesvermessungsamt* (digandakan dari Kantor Pengukuran Hessen, Jerman), Wiesbaden, Hochschulbibliothek Darmstadt, Hessische Landesbibliothek, Haaschen.
- Hoerner, S. F., 1965, *Fluid Dynamic Drag*, Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance, New Jersey: 07432, Published by the Author, 148 Busted Drive, Midland Park.
- Kellerhals R., et al., 1976, *Classification and Analysis of River Processes*, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 102, No. HY7, pp. 813-829.
- Kern, K., 1994, *Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung, Geomorphologisches Entwicklung von Fließgewässern* (Konsep dasar Pembangunan Wilayah Keairan Ramah Lingkungan, Perkembangan Geomorfologi Wilayah Sungai), Berlin/Heidelberg/New York: Spinger-Verlag.
- Leopold, L.B., Langbein, M.G., Miller, J.P., 1966, *River Meanders Theory of Minimum Variance*, Washington: Geological Survey Professional, Paper 422-H, United States Government Printing Office.
- Maryono, A., 2008, Karakteristik Geometri dan Resistensi Pulau di Sungai, Yogyakarta: *Media Teknik* No. 4, Th. XXIX Edisi Nov, No. ISSN 026-3012, FT, UGM.
- Maryono, A., Nestmann, F., 1998, *Application of Aerodynamic Model to Understand The Erosion and Sedimentation Problems in Aare-Rhein Confluence*, Yogyakarta, Indonesia: Proc. of 11th-APD-IAHR Congress, September, pp. 627-635.
- Modi, P. N., 1995, *Irrigation Water Resources and Water Power Engineering*, Nai Sarak, Delhi, India: 3rd Edition, Standard Book House.
- Naudascher, E. 1987, *Hidraulik der Gerinne und Gerinnebauwerk* (Hidrolika Saluran dan Bangunan Air pada Saluran Terbuka), Springer Verlag, Wina, Austria.
- Nestmann, F., Bachmeier, G., 1987, *Anwendung von Luftmodellen*, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 61, Karlsruhe.
- Yalin, M. S., 1977, *Mechanics of Sediment Transport*, Oxford/ New York/Toronto: 2nd Edition, Pergamon-Press

