

Studi Pemilihan Sistem Visualisasi Aliran Untuk Model NoseI

Bagus H. Jihad*, Ganda Samosir*, Tresna P. Soemardi**

*Bidang Propulsi, Pusat Teknologi Wahana Dirgantara LAPAN

Jl. Raya LAPAN, Rumpin Bogor.

**Guru Besar Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok 16424

E-mail : baguserek@yahoo.com

Ringkasan

Visualisasi aliran sangat penting dalam studi sistem aliran. Dengan visualisasi ini dapat diperoleh validasi antara teori dan praktik. Demikian halnya aliran kompresibel dalam sebuah noseI. Untuk memverifikasi hasil desain, selain dilakukan menggunakan software CFD juga dilakukan dengan mempelajari hasil visualisasinya. Beberapa sistem visualisasi yang umum digunakan disajikan pada paper ini. Kemudian dilakukan analisis dengan memperhatikan keunggulan dan kelemahan masing-masing sistem terhadap model noseI yang akan didesain. Pertimbangan dilakukan terhadap faktor-faktor; biaya, manufacturability, dimensi, adaptability dan kualitas imej serta pengaruh lingkungan. Masing-masing kepentingan diberi bobot sesuai prioritas desain dan dilakukan perbandingan dengan memberikan rating pada setiap kriteria.

Dari hasil analisis disimpulkan bahwa sistem schlieren lebih tepat digunakan untuk memvisualisasikan sistem aliran pada model noseI. Hasil studi akan dilanjutkan dengan desain sistem schlieren untuk mempelajari aliran pada model noseI, yang berguna untuk meningkatkan desain noseI roket yang dikembangkan LAPAN.

Kata Kunci : visualisasi, system schlieren, aliran, model noseI.

PENDAHULUAN

Untuk mempelajari lebih mendalam mengenai aliran, baik itu laminar atau turbulen, dibagian dalam benda atau bagian luarnya, telah dirintis oleh para ilmuwan beberapa dekade yang lalu. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan kepastian bentuk desain yang akurat. Untuk mendapatkan desain itu, beberapa metoda dilakukan; antara lain menggunakan metoda numerik, komputasi dinamika fluida, yang dikenal dengan CFD.

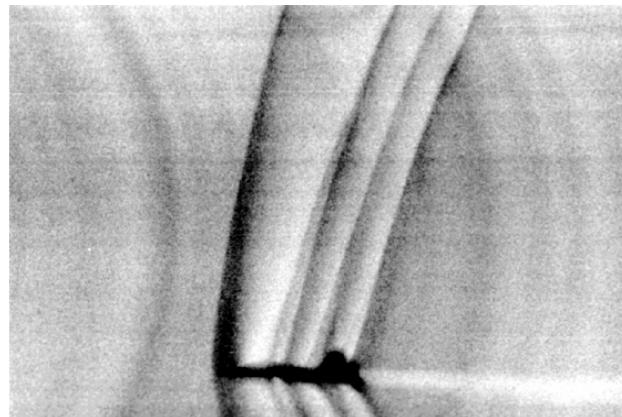
CFD digunakan untuk menghitung dan memberikan pola distribusi aliran, temperatur, tekanan, kecepatan dan lain sebagainya. Pola yang diperoleh bukan hanya pada bagian dalam obyek tetapi juga bagian luar, yang dikenai oleh aliran fluida sesuai dengan kondisi batas yang diberikan. Walaupun hasil yang diperoleh menggunakan CFD dapat diandalkan, tetap saja para peneliti baik di institusi penelitian ataupun universitas tetap melakukan upaya untuk dapat memvisualisasikan aliran yang terjadi di dalam noseI atau setelah keluar noseI.

Dengan visualisasi ini, desainer dapat menganalisis apakah desain dan predksi yang dilakukan telah sesuai dengan kondisi yang sebenarnya, walaupun lebih sering visualisasi dilakukan terhadap model. Metoda yang paling banyak diaplikasikan saat ini adalah metoda optikal dengan memanfaatkan gradient densitas benda/obyek yang dikenai sumber cahaya melalui lensa atau cermin. Cahaya tersebut kemudian dibiaskan lagi melalui lensa atau cermin dan diteruskan sebuah layar untuk ditangkap imejnya. Untuk mendapatkan detil pola aliran, imej pada layar direkam menggunakan kamera kecepatan tinggi (highspeed camera).

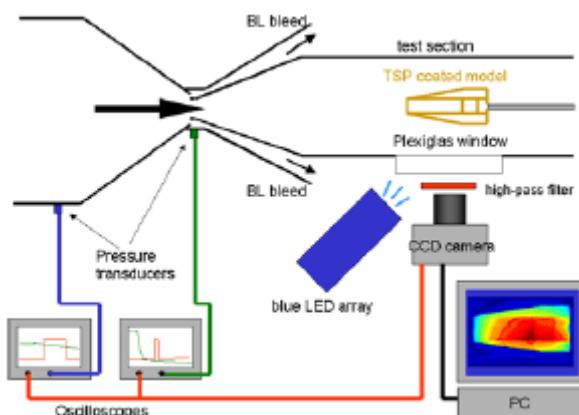
Salah satu pencapaian yang terbaru adalah hasil visualisasi optik menggunakan teleskop diberikan pada gambar 1, yang disebut dengan SAF (Schlieren at Aircraft in Flight) pada pesawat T-38 yang terbang dengan kecepatan Mach = 1,1. Sistem ini menggunakan matahari sebagai sumber cahaya.

Penelitian terbaru lainnya adalah metoda yang menggunakan cat untuk memvisualisasikan distribusi temperatur dan tekanan pada sebuah obyek yang dikenai aliran fluida. Metoda ini dikenal dengan TSP dan PSP (Temperature and Pressure Sensitive Paint Systems). Metoda Fluorescent Oil-Flow dapat juga digunakan untuk memvisualisasikan medan aliran yang menyeluruh dimana hal ini tidak dapat dipenuhi oleh metoda TSP [Matsumura, 2003].

Penelitian yang dilakukan oleh Richard, et al., dari Institut für Strömungsmechanik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), melakukan penelitian dengan apa yang disebut BOS (Background Oriented Schlieren). Metoda ini memberikan kemampuan qualitatif dan kuantitatif pada medan densitas yang unsteady pada aliran kecepatan tinggi, pembakaran dan uji terbang skala penuh. Keunggulan metode ini adalah kemampuannya untuk memvisualisasikan obyek yang bergerak (Richard, H., et al., 2001).



Gambar 1. Schlieren pada Aircraft in Flight (SAF), pesawat T-38 pada kecepatan Mach 1,1 [ASOMB, 2006].



Gambar 2. Skema Penelitian TSP yang dilakukan oleh Matsumura.

Yang menarik adalah apa yang dilakukan Settle et al., di Penn State University tepatnya di Gas Dynamics Lab, Mechanical Engineering Dept., yang memvisualisasikan obyek pada skala penuh, bahkan imaje yang dihasilkan tidak lagi black and white atau grey, tetapi memiliki warna yang sesuai obyeknya. Beberapa gambar berwarna yang menarik disajikan [Settle, 2004].

Ada bermacam pilihan visualisasi yang umum digunakan dalam menganalisa aliran. Dalam paper ini disajikan pemilihan sistem yang tepat, yang akan digunakan untuk memvisualisasikan aliran di dalam nosel (model). Dibahas keuntungan dan kekurangan dari tiap sistem kemudian dibandingkan dengan spesifikasi yang ingin dicapai.



Gambar 3. Visualisasi aliran pada sepeda motor skala penuh [Settles, et al., 1995].

Tujuan Studi

Tujuan dari studi ini guna mempelajari dan memilih sebuah sistem imaging yang akan digunakan untuk memvisualisasikan aliran fluida di dalam nosel (model) dan bentuk keluarannya.

Tahap Penelitian

Penelitian ini akan terbagi menjadi 5 tahapan; penelusuran pustaka, desain, pengembangan prototipe, pengujian dan konstruksi akhir. Dalam tahap awal beberapa sistem dievaluasi agar tahap selanjutnya dapat segera dilaksanakan. Pada tahap ini diperlukan sebuah studi dan konstruksi beberapa setting visualisasi aliran untuk menentukan sistem yang paling optimal. Penjelasan yang lengkap dari sistem ini akan dipaparkan. Pertimbangan akan dititik beratkan pada beberapa hal, yaitu ease of use, adaptability, cost dan size.

Setelah studi selesai dilakukan, akan dilakukan tahap desain, prototipe akan dibuat didasarkan pada metoda terbaik hasil studi.

TINJAUAN PUSTAKA

Dari studi pustaka yang telah dilakukan, ada tiga jenis sistem imaging yang umum digunakan untuk memvisualisasikan aliran pada kecepatan tinggi. Ketiga jenis sistem tersebut adalah shadowgraph, interferometer dan schlieren.

Shadowgraph mengambil keuntungan dari besaran pembiasan cahaya yang bergerak melalui perubahan densitas. Imej dibentuk oleh proyeksi sinar yang dibiaskan ke sebuah layer, dimana daerah gelap terang mengindikasikan area dengan perbedaan densitas. Daerah gelap terang ini dibentuk oleh pembiasan melalui gradient densitas dalam seksi uji.

Interferometer menggunakan karakteristik panjang gelombang cahaya untuk menerangi daerah gelap dari densitas yang berbeda. Imej gelap terang dibentuk oleh interferensi constructive dan destructive cahaya yang melewati seksi uji.

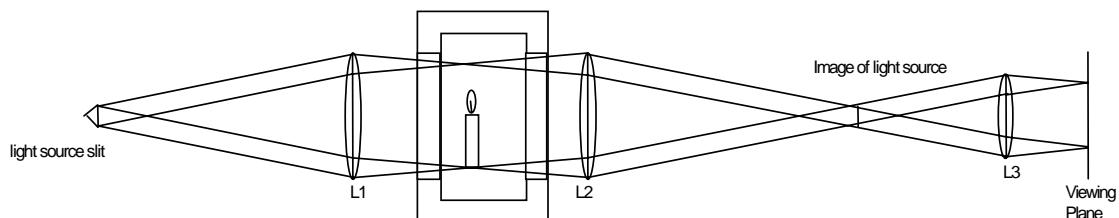
Sistem Schlieren mirip dengan system shadowgraph karena mengambil keuntungan dari besaran pembelokan cahaya melalui gradient densitas. Imej dibentuk ketika cahaya yang dibiaskan diproyeksikan pada sebuah bidang datar. Sebuah *knife edge* digunakan untuk mengeliminasi cahaya yang dibiaskan sehingga imej mempunyai tingkat sensitivitas yang lebih tinggi, resolusi yang lebih baik dan kemampuan perbedaan pemfokusan.

SISTEM OPTIK

a. Sistem Shadowgraph

Shadowgraph adalah sebuah sistem penggambaran gradient densitas yang menggunakan besaran-besaran pembiasan cahaya untuk membentuk imej. Sistem imaging shadowgraph menggunakan penerangan dari sumber cahaya yang dikolimasi oleh lensa atau cermin dan

meneruskannya ke bagian seksi uji. Gradien densitas dalam seksi uji terjadi karena cahaya yang dibiaskan. Ketika sinar cahaya keluar dari seksi uji difokus ke sebuah layar, pola gradient densitas akan terlihat. Daerah gelap akan muncul dimana sinar cahaya dibiaskan dari layar sementara daerah yang lebih terang dibentuk dimana cahaya mengenai layer.



Gambar 1. Sistem Shadowgraph.

Shadowgraph sebenarnya identik dengan system Schlieren, tetapi system shadowgraph cenderung menghasilkan image yang agak kabur (blur) karena kurangnya presisi peralatan.

Bahan yang dibutuhkan:

- Lensa atau cermin, sumber cahaya, penyetel posisi, dan rel optik.

Keuntungan :

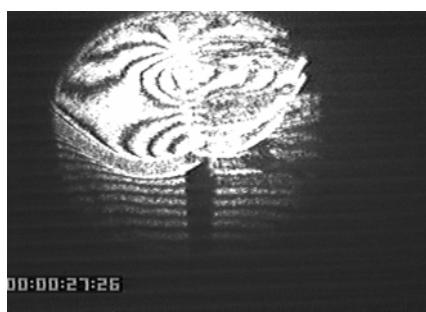
- Biaya relative murah, mudah diatur, dan mudah dikonstruksi, di-setup dan dipindahkan.

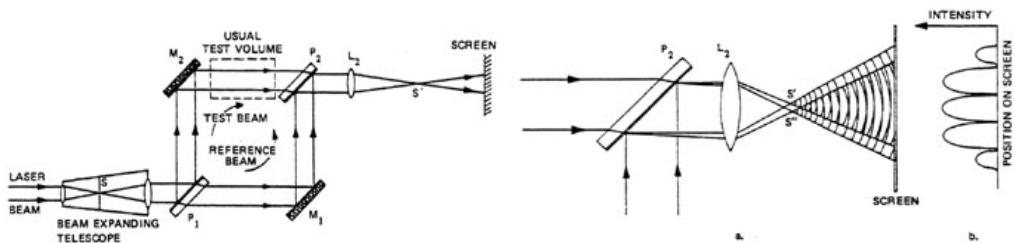
Kerugian ;

- Kualitas imej rendah

b. Sistem Interferometer

Interferometer menggunakan tambahan constructive dan destructive dari gelombang cahaya untuk membentuk imej pada sebuah layer. Sinar-sinar yang identik diproyeksikan pada bagian atas dari masing-masing yang lain untuk membentuk imej yang didasarkan pada perbedaan panjang gelombang dalam satu *path* sinar. Pola interferensi dinamakan dengan '*fringe*'. Fringe ini dibentuk ketika panjang gelombang dari sinar diteruskan melalui seksi uji diganggu oleh sinar yang lain. Ketika sinar melewati seksi uji panjang gelombangnya berubah. Imej dibentuk sebagai hasil interferensi constructive dan destructive kedua sinar cahaya. Interferensi constructive akan membentuk garis terang dimana interferensi destructive akan menghasilkan daerah lebih gelap sehingga gradient densitas dapat dilihat.





Gambar 2. a) Interferogram, b) interferometer.

Gambar 2 adalah contoh sebuah interferometer dengan satu sumber cahaya. Laser dipecah oleh cermin 50% refleksi dan 50% transmisi menghasilkan path sinar cahaya yang identik. Satu path dikirim melalui seksi uji sedangkan yang lain tidak. Cermin datar digunakan untuk menyatukan dua sumber cahaya pada bidang pandang yang sama untuk memperlihatkan pola interferensi.

Bahan :

- Sumber cahaya laser, beam-expanding telescope, cermin dan pemegang, layar, meja optic, pompa vakum, katup jarum, pelat gelas datar parallel, gelas difusi, filter densitas, dan pengukur tekanan vakum

Keuntungan :

- kualitas imej tinggi, penggunaan seksi uji yang besar

Kekurangan :

- Jumlah komponennya banyak, pengaturan ketepatan, sensitive terhadap lingkungan, kesulitan konstruksi, setup dan transportasi, dan biaya tinggi

c. Sistem Schlieren

Sistem schlieren serupa dengan system shadowgraph yang menggunakan besaran pembiasan cahaya sebagai media melalui gradient densitas. Pada kebanyakan konfigurasi dasarnya, sistem ini dibuat menggunakan lensa dan cermin.

Sistem schlieren relative mudah dibuat, biaya relative murah dan menghasilkan kualitas imej yang jelas. Untuk alasan ini, maka penelitian selanjutnya difokuskan pada system schlieren untuk memenuhi kebutuhan studi. Untuk keprluan ini dua konfigurasi schlieren dipetimbangkan dalam desain. Konfigurasi pertama adalah sebuah schlieren dasar yang dibuat menggunakan cermin *spherical*. Konfigurasi yang kedua adalah sebuah schlieren fokus menggunakan *ronchi ruling*.

1. Konfigurasi Schlieren konvensional.

Sistem ini menggunakan cermin untuk mengkolimasi cahaya dari sumber cahaya melalui seksi uji. Pada saat cahaya melintasi seksi uji, cahaya dibiaskan akibat gradient densitas pada seksi uji. Cahaya meninggalkan seksi uji kemudian difokuskan ke sebuah titik sumber dimana sebuah *knife-edge* ditempatkan untuk mengeliminasi bias sinar yang sedang difokus pada sebuah bidang. Imej kemudian difokuskan kedalam bidang pandang dimana bagian gelap dibentuk akibat ketidadaan bias cahaya dan daerah terang dibentuk oleh sinar cahaya yang sampai pada bidang.

Analisis yang dilakukan oleh Weinstein pada schlieren konvensioanal memberikan persamaan untuk menentukan sensitifitas sistem dan resolusi imej yang dihasilkan.

Sensitifitas:

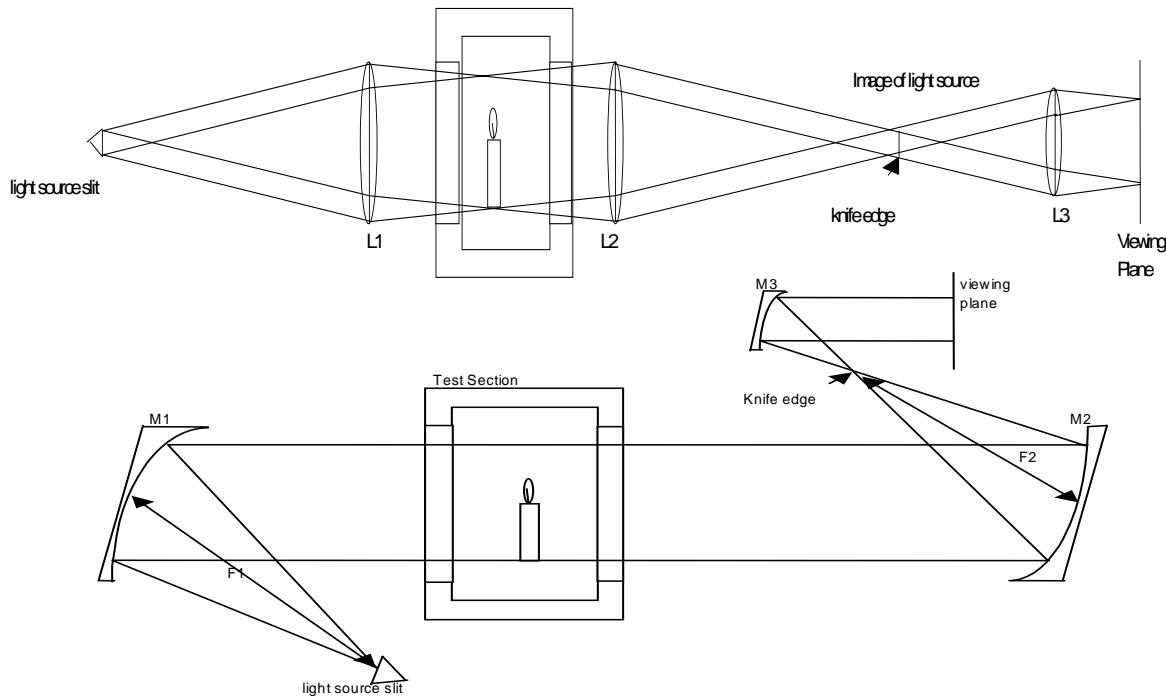
$$\varepsilon'_{\min} = 0,1 * (a / L') \text{ rad ; atau } \varepsilon'_{\min} = 20,626 * (a / L') \text{ arc sec} \quad (1)$$

Dimana,

ε'_{\min} = perubahan sudut menghasilkan 10% perubahan *brightness* pada schlieren konvensional

a = Tinggi sumber cahaya imej diatas cutoff atau *knife-edge*

L' = Jarak dari lensa atau cermin ke lokasi cutoff atau *knife-edge*



Gambar 3. a) Konfigurasi dasar lensa, b) konfigurasi dasar cermin.

Persamaan di atas memberikan perubahan sudut minimum menghasilkan 10% perubahan pada *brightness*. Weinstein mengatakan bahwa beda 10% pada brightness adalah yang perubahan cahaya terkecil yang dapat dideteksi. Perubahan sudut minimum berhubungan langsung dengan sudut pembiasan cahaya yang melalui seksi uji. Dengan mengetahui sudut pembiasan yang terkecil dalam sistem memberikan informasi yang berharga tentang kemampuan sistem schlieren untuk menangkap gradient densitas yang kecil. Persamaan ini digunakan untuk mengevaluasi sensitifitas dan menentukan gradient densitas terkecil yang tampak pada sistem.

Resolusi

$$d' = 1,22F'\lambda / A_3; w' = 1,22(l'-L')\lambda / (m'A_3) \quad (2)$$

di mana,

- d' = Batas resolusi difraksi dari aperture circular
- w' = Batas resolusi difraksi lensa dari detail aliran
- F' = Jarak dari cutoff ke imej
- λ = Panjang gelombang cahaya
- l' = Jarak dari cermin atau lensa ke lokasi akhir imej
- A_3 = Diameter efektif dari focus lensa

Resolusi menyatakan tingkat tampak detil dari imej yang dihasilkan. Resolusi dibatasi oleh difraksi cahaya akibat path optik melalui aperture circular dan oleh penyimpangan (kelainan) geometri lensa/cermin. Panjang gelombang sumber cahaya juga dipertimbangkan ketika mengevaluasi resolusi dari sistem. Nilai resolusi akan digunakan ketika memilih geometri lensa/cermin untuk sistem.

Bahan :

- Sumber cahaya, 2 atau 3 cermin spherical, Knife-edge, bidang pandang, pemegang knife edge, pengatur lensa atau cermin, dan rel optik.

Keuntungan :

- path cahaya dapat dibalikkan menggunakan cermin, jumlah komponen sedikit, kualitas imej baik, relative murah, mudah dikonstruksi, diatur dan dipindahkan.

Kerugian :

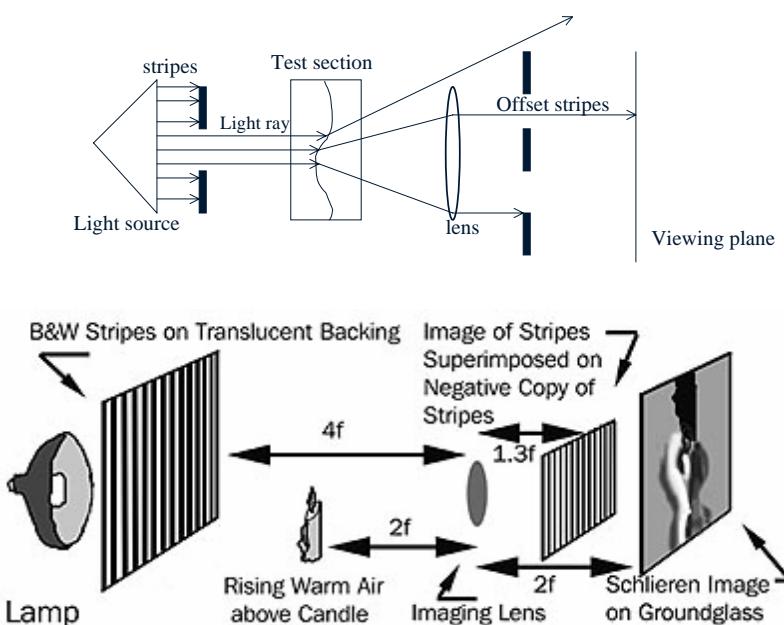
- Dengan konfigurasi Z dibutuhkan ruang lebih besar.

2. Konfigurasi Schlieren focus (menggunakan Ronchi Ruling)

Schlieren fokus menggunakan ronchi rulling, sebuah rangkaian strip buram tipis dengan lebar yang sama dari material tembus pandang, untuk mengirimkan sinar cahaya melalui seksi uji dimana sinar cahaya dibiaskan akibat gradient densitas. Cahaya meninggalkan seksi uji difokuskan ke dalam ronchi rulling kedua yang merupakan negative dari yang pertama, dimana cahaya tak-bias dieliminasi dan cahaya dibiaskan dengan meneruskannya ke bidang pandang. Imej diproyeksikan ke bidang pandang sebagai imej negative. Ronchi rulling menggantikan cermin kolimasi dan knife-edge.

Keuntungan dari schlieren fokus kemampuan untuk dimodifikasi untuk menhasilkan focus yang tajam dengandaerah yang dekat seksi uji. Ini membuatnya mampu mengeliminasi gradient densitas dari lingkungan yang dapat membuat imej menjadi kabur/buram.

Persamaan untuk sensitifitas dan resolusi untuk schlieren focus sama dengan schlieren konvensional diatas. Weinstein juga memberikan persamaan untuk menghitung gridline cutoff dan kedalaman dari fokus.



Pandangan atas system. Sinar cahaya tunggal melewati ronchi pertama dan diteruskan ke seksi uji. Hanya sinar yang dibiaskan yang dapat melewati ronchi kedua (atas). Model ini menunjukkan dua ronchi rulling dan lensa fokus serta jarak focal (bawah).

Gambar 4. Sistem schlieren focus.

Sensitifitas :

$$\varepsilon_{\min} = \frac{20.626aL}{[L'(L-1)]} \text{ arc sec} \quad (3)$$

di mana :

- ϵ_{\min} = perubahan sudut menghasilkan 10% perubahan *brightness* pada schlieren fokus
 a = Tinggi imej sumber cahaya diatas cutoff
 L' = Jarak lensa atau cermin dari lokasi cutoff
 L = Jarak dari sumber grid ke lensa imej

Resolusi :

$$F = (l' - L') ; d = \frac{2(l' - L')\lambda}{b} ; w = \frac{2(l' - L')\lambda}{mb} \quad (4)$$

di mana,

- F = Jarak dari cutoff ke imej
 λ = Panjang gelombang cahaya
 l' = Jarak dari lensa tau cermin ke lokasi imej akhir
 L' = Jarak dari lensa atau cermin ke lokasi cutoff
 d = Batas resolusi akibat difraksi dari celah (slit)
 w = Batas resolusi difraksi grid dari detil aliran
 m = Pembesaran imej
 b = Jarak antara gridline cutoff

Persamaan untuk sensitifitas akan digunakan untuk menentukan gradient densitas terkecil yang dapat ditampakkan oleh sistem. Resolusi akan digunakan untuk menentukan jarak optimum antara komponen optik.

Grid yang digunakan harus presisi dan akurat untuk mendapatkan kualitas imej yang baik. Persamaan berikut digunakan menghitung jumlah garis yang dibutuhkan untuk membentuk kualitas imej didasarkan pada tipe lensa yang digunakan.

$$\phi = An \frac{l' - L'}{2l'} \quad (5)$$

di mana,

- ϕ = Pasangan dari garis yang terlibat dalam membentuk masing-masing titik dalam fokus imej schlieren
 A = Aperture yang bersih dari imej lensa schlieren fokus
 l' = Jarak dari lensa/cermin ke lokasi imej akhir
 L' = Jarak dari lensa/cermin ke lokasi cutoff
 n = Gridline per millimeter pada grid cutoff

Keuntungan sistem schlieren fokus adalah kemampuannya untuk dimodifikasi untuk difokuskan pada bidang dalam seksi uji. Ini memungkinkan melihat area tertentu dari seksi uji tanpa interferensi dari gradient densitas lingkungan sekitar. Juga kemungkinan mengambil beberapa imej pada bidang yang berbeda membuatnya memungkinkan membentuk imej tiga dimensi dari seksi uji.

Bahan :

- 2 ronchi rulling, sumber cahaya, lensa fokus, bidang pandang, rel optikal, pemegang dan pengatur lensa dan ronchi rulling

Keuntungan :

- Biaya komponen rendah, kualitas imej bagus, mudah diatur, dikonstruksi dan dipindahkan, kemampuan focus ke dekat seksi uji, path optikalnya lurus, sumber cahaya biasa dapat digunakan

Kekuarangan ;

- Dibatasi oleh ukuran karena panjang focal dari lensa fokus, kesulitan pelurusan rulling pada awalnya.

EVALUASI

Kebutuhan desain imaging yang diinginkan untuk dikonstruksi adalah sebagai berikut::

- a. Ekonomis, biaya harus semurah mungkin.
- b. Manufakturability (a), relatif mudah diproduksi
- c. Manufacturability (b), mudah direproduksi apabila diperlukan.
- d. Dimensi, keterbatasan ruang mengharuskan pemilihan sistem dengan ukuran yang kecil.
- e. Adaptability, sistem harus mudah dipindahkan dan di setup.
- f. Image quality, imej yang dihasilkan harus jelas dan tepat. Optik harus memiliki tingkat presisi dan kualitas yang tinggi.
- g. Environment, pengaruh lingkungan berpengaruh pada hasil.
- h. Health and safety, aman dan tidak berbahaya bagi kesehatan.

Masing-masing kriteria tersebut diberi bobot sesuai dengan kepentingan dalam desain ini, nilai 10 adalah yang tertinggi. Selanjutnya masing-masing sistem diberi rating antara 1-4 (sebagai pembanding lihat Jihad, 1996). Berdasarkan analisis diperoleh table bobot indeks (index weight) pada table 3-1. Setelah nilai teknis dihitung, nilai teknologi ekonomis diperoleh dengan membagi nilai teknis terhadap nilai ekonomis. Kesulitan dihadapi ketika membuat perbandingan ekonomis, disebabkan oleh tingginya biaya pada sistem interferometer, yaitu harga laser beam. Tetapi bila, hal tersebut telah ada, maka unsur perawatan dapat dipertimbangkan sebagai bagian dari criteria pemilihan.

Tabel I. Sistem penilaian bedasarkan bobot kepentingan.

No.	Karakteristik	Nilai ideal	Bobot	Perbandingan nilai			
				Shadowgraph	Interferometer	Schlieren	
						Lensa	Cermin
1.	Man.ability (a)	4	5	4	2	4	3
2.	Man.ability (b)	4	5	4	2	4	4
3.	Dimension	4	8	4	2	4	3
4.	Adaptability	4	9	4	2	4	4
5.	Image quality	4	10	1	4	3	3
6.	Environment	4	7	4	2	4	4
Total		24	44	21	14	23	21
Bobot x Nilai		176		146	108	166	153
Nilai Teknis		1		0.830	0.614	0.943	0.869
Nilai Ekonomis		1		1	10	1	1
Tekno-Ekonomis		1		0.830	0.061	0.943	0.869

Didasarkan pada uraian di atas, dan beberapa poin pertimbangan, maka dipilihlah sistem imaging menggunakan sistem schlieren lensa. Sistem ini cukup ekonomis, adaptable dan relatif sederhana untuk dibuat.

PENUTUP

Dari paparan tersebut di atas, pilihannya ada pada sistem Schlieren untuk memvisualisasikan aliran dalam nosel. Ada dua pilihan yang harus dikaji lebih mendalam, sistem lensa atau sistem cermin dengan perbedaan nilai teknis 0.943 dan 0.869. Keduanya memiliki kualitas imej yang sama, perbedaannya hanya terletak pada kebutuhan ruang yang lebih kompak untuk sistem Schlieren dengan lensa. Tentu saja bila hanya dua sistem ini yang diperbandingkan, maka nilai teknologi-ekonomisnya akan berubah, karena perubahan pada nilai ekonomis dimana harga cermin lebih mahal dibandingkan harga lensa. Bila ini yang dijadikan penentu akhir, maka pilihan akhir adalah pada sistem imaging schlieren dengan lensa.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASOMB (Advanced Sensing and Optical Measurement Branch), <http://www.larc.nasa.gov/WWW/OptInstr/schl.html>, Januari 2006.
2. Clemens, T. Noel., *Flow Imaging*, pp 390 – 419, University of Texas, Austin, Texas.
3. Chun, K. S., 1994, *Focused Schlieren Flow Visualization Studies of a Multiple Venturi Fuel Injectors in a High Pressure Combustor*, NASA TM 106479, National Aeronautical and Space Administration, Lewis research Center, Cleveland, OH.
4. Davidhazy, Andrew, *Basic on Focusing Schlieren System*, <http://www.rit.edu/~andpph/text-schlieren-focus.html>, Januari 2006.
5. Halliday, David; Robert, Resnick dan Krane, Kenneth S., 1992, *Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
6. Henderson, Scott, 2000, *Flow Visualization System for a Pulse Detonation Engine*, Mechanical Engineering Dept. Seattle University.
7. Jihad, Bagus H., 1996, *Analisis Tekno Ekonomi Proses Manufaktur Komponen Komposit Pesawat Terbang*, Tesis, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta
8. Markusic, T. E. dan Choueiri, E. Y., 2000, *Schlieren Techniques for the Visualization of Current Sheets in Pulsed Electromagnetic Accelerators*, AIAA Paper-2000-3433z.
9. Matsumura, Shin, et al., 2003, *Flow Visualization Measurement Techniques for High-Speed Transition Research in the Boeing/AFOSR Mach 6 Quiet Tunnel*, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 20-23 Juli 2003, Huntsville, AL, AIAA Paper -2003-4583.
10. Oostuizen, Patric H., Carscallen, William E., 1997, *Compressible Fluid Flow*, Appendix K pp. 517-523, McGraw Hill Co. Inc., New York.
11. Richard, H., et al., Juni 2006, *Demonstration of the Applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) Method*, DLR, Germany.
12. Settles, Gary S., 2001, *Full Scale Schlieren Flow Visualization, Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer-Verlag,
13. <http://www.mne.psu.edu/psgdl/schlierenbookwebpages.html>
14. Settles, Gary S., 2004, *The Penn State Full-Scale Schlieren System*, 11th International Symposium on Flow Visualization, August 9-12, 2004, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, USA.
15. Vlad, V. I. dan Pallas, N. Ionescu, 2003, *Analytical Treatment of Schlieren Method for Precise Quantitative Characterisation of Fluid Dynamics*, Romanian Report in Physics, Volume 55, Number 4, pp 587-599.
16. Weinstein, Leonard M., 2000, *Large Field High-Brightness Focusing Schlieren System*, AIAA 31(7)-2000.
17. <http://carambola.usc.edu/HONDA/HONDA.htm>.