

**RANCANGAN SISTEM VAKUM UNTUK PROSES Pengerasan
KOMPOSIT DENGAN METODE WET LAY UP
DI PROGRAM STUDI TEKNIK PESAWAT UDARA**

Rivan Maulana Yusuf⁽¹⁾, Ego Widoro⁽²⁾, Djoko Herwanto⁽³⁾

Sekolah Tinggi Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang.

Abstrak: Proses pengerasan panel komposit memerlukan sistem vakum untuk menghilangkan gelembung udara dan sistem pemanas untuk mempercepat pengerasan. Sistem vakum dan sistem pemanas pada praktek pengerasan panel komposit di program studi teknik pesawat udara dilakukan secara terpisah, sehingga dibutuhkan alat pengerasan panel komposit yang terintegrasi antara sistem vakum dan sistem pemanas. Sistem vakum pada alat proses pengerasan panel komposit dirancang melalui tahapan perancangan yang meliputi pemilihan pompa vakum, selang yang digunakan, perancangan dan pemilihan sistem vakum. Hasil pembahasan diperoleh debit aliran yang dihasilkan pompa. Debit aliran sebesar 37 L/min. Dengan kecepatan fluida sebesar 20m/s. Tekanan vakum yang diberikan pompa sebesar 14,5 inHg. Komponen yang dibutuhkan sistem vakum adalah pompa vakum, vakum regulator, vacuum gauge, nipple, vacuum bagging port, selang fleksibel teflon.

Kata Kunci: panel komposit, pengerasan komposit, sistem vakum,

Abstract: *Composite Curing process is need vacuum system to remove air bubble and heating system to decrease time of curing proses. Vacuum and heating system at composite panel curing practical at program studi teknik pesawat udara conducted separately, so need composite panel curing equipment that have integrated Vacuum and heating system. Vacuum system in this composite panel curing equipment is designed by design step including vacuum pump selection, hose selection, vacuum system design. Discussion results rate of flow of 37 L/min. With the fluid velocity of 20m/s. vacuum pump pressure of 14.5 inHg. Components required for vacuum system is a vacuum pump, vacuum regulator, vacuum gauge, nipple, vacuum bagging port, flexible Teflon hose.*

Keyword: *composite panel, composite curing, vacuum system*

Pendahuluan

Proses pengerasan panel komposit memerlukan sistem vakum untuk menghilangkan gelembung udara dan penekanan sehingga serat-serat komposit terisi penuh oleh matriks dan menyatu dengan sempurna serta sistem pemanas untuk mempercepat proses pengerasan dengan menggunakan *heat gun*. Sistem vakum dan sistem pemanas pada praktek pengerasan panel komposit menggunakan metode *wet lay-up* di program studi teknik pesawat udara dilakukan secara terpisah, sehingga dibutuhkan perancangan alat pengerasan panel komposit yang terintegrasi antara sistem vakum dan sistem pemanas.

Sistem vakum pada alat pengerasan panel komposit dirancang menggunakan teori-teori yang berkaitan yaitu: teori komposit, perpindahan panas, mekanika fluida, komponen-komponen vakum dan teori material

Tujuan dari perancangan sistem vakum pada alat pengerasan panel komposit metode *wet lay-up* ini adalah memilih pompa vakum, selang fleksibel, vakum regulator, indikator vakum dan merancang *vacuum bagging port* untuk proses pengerasan dengan metode *wet lay-up*.

Metodologi Perancangan

Perancangan sistem vakum pada alat tungku pemanas untuk proses pengerasan panel komposit dengan metode *wet lay-up* memperhatikan proses pengerasan yang memerlukan temperatur dan tekanan yang konstan agar proses penyatuan matriks dan fiber menjadi sempurna dalam pembuatan material komposit. Selain itu, temperatur yang dibutuhkan berdasarkan jenis

matriks yang dipakai. Pada keadaan sebelumnya penyebaran panas yang diberikan tidak merata.

Sistem kerja rancangan sistem vakum pada alat tungku pemanas berfungsi untuk menghilangkan gelembung udara yang berada dalam *vacuum bag* pada saat proses pengerasan panel komposit.

Perancangan sistem vakum ini berdasarkan teori komposit dan pompa. Teori komposit untuk menentukan temperatur dan tekanan yang dibutuhkan untuk proses pengerasan panel komposit berdasarkan jenis matriks yang akan dipakai. Teori pompa digunakan untuk menentukan jenis pompa vakum yang digunakan untuk menghilangkan gelembung udara pada *vacuum bag*.

Saat ini praktikum komposit di program studi Teknik Pesawat Udara, alat pemanas dan sistem vakum di pasang terpisah. Saat proses pengerasan panel komposit, pemanasan dilakukan menggunakan *heat gun*, dimana panas yang dihasilkan oleh heat gun tidak merata ke seluruh panel komposit yang dilapisi *vacuum bag*, yang juga diberikan tekanan vakum. Berdasarkan prosedur pengerasan panel komposit, panel komposit yang akan dibuat harus mendapatkan panas yang merata dan tekanan yang sesuai, agar hasil pembuatan panel komposit sempurna. Penggunaan *heat gun*, tidak memberikan panas yang merata terhadap pengerasan panel komposit.

Oleh karena itu diperlukan perancangan sistem vakum dan alat pemanas untuk proses pengerasan panel komposit dalam satu rancangan yaitu tungku pemanas. Agar pemberian panas dan tekanan vakum lebih merata.

Perancangan sistem vakum pada alat/tungku pemanas pada proses pengerasan panel komposit dibagi menjadi beberapa blok fungsi. Masing-masing blok fungsi mempunyai kriteria masing-masing.

1. Pompa Vakum, kriteria merancang pompa dengan indikator :
 - Dapat memberikan tekanan vakum sebesar atau kurang dari 22 inHg
 - Vakum *inlet* sesuai dengan diameter dalam selang $\frac{1}{4}$ inch.
2. Selang fleksibel, kriteria merancang selang dengan indikator :
 - Material selang tahan terhadap temperatur 100°C dan hisapan pompa vakum 22inHg.
 - Diameter dalam *Fitting* sebesar $\frac{1}{4}$ inch.
 - Diameter dalam selang $\frac{1}{4}$ inch.
3. Katup vakum regulator, merancang katup vakum regulator dengan indikator :
 - Jenis katup pengatur sesuai dengan aliran yang diberikan.
 - Bukaannya katup tidak terjadi kebocoran.
 - Aliran vakum tetap terjaga sebesar atau kurang dari 22 inHg.
4. Indikator Vakum , merancang indikator vakum dengan indikator :
 - Penunjukan aliran vakum dalam nilai inHg atau cmHg.
 - Tekanan vakum yang dialirkan dapat di baca.
5. *Vacuum bagging port*, merancang *vacuum bagging port* dengan indikator :
 - Material *port* yang dapat tahan terhadap temperatur 100°C .
 - Material *seal* dapat tahan terhadap temperatur 100°C .

Blok fungsi yang tersebut dibuat untuk mempermudah proses dan tahapan perancangan yang memiliki tujuan akhir yang sama yaitu mengoptimalkan proses penyatuan matriks dan fiber pada pengerasan material komposit agar kekuatan dari material komposit tersebut tidak berkurang. Dalam proses pengerasan komposit udara yang berada di dalam *vacuum bag* harus dikeluarkan supaya hasil dari penyatuan material komposit sempurna dan kuat seperti sifat material yang digabungkan.

Proses dan Tahapan Perancangan

Gambaran umum sistem rancangan alat/tungku pemanas yang digunakan pada proses pengerasan panel komposit *wet lay-up*. terdiri dari

1. Tungku
2. Sistem pemanas, dan
3. Sistem vakum.

Pada perancangan ini dikhususkan untuk merancang sistem vakumnya saja, sedangkan tungku dan sistem pemanas dirancang pada penelitian/perancangan yang lain. Sebagaimana sdh disampaikan pada metodologi perancangan pada sistem vakum pada perancangan ini dibagi menjadi 5 blok fungsi. Setiap blok fungsi memiliki fungsi dari kriteria perancangan masing-masing yang dimaksudkan untuk mempermudah dalam tahapan perancangan yang terdiri dari: pompa vakum, selang fleksibel, katup vakum regulator, indikator vakum, dan *vacuum bagging port* (gambar 1)

Bagian selang dalam rancangan sistem vakum berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluida (udara) hisap dan penghubung antara pompa vakum dengan benda kerja. Hisapan yang diberikan oleh pompa vakum untuk

menghilangkan gelembung udara yang masih tertinggal saat penggabungan material komposit. Tekanan yang dibutuhkan untuk menghilangkan gelembung udara sebesar atau kurang dari adalah 20 inHg. Saya akan memilih dan menghitung dimensi selang. Karena semakin besar kecepatan fluida yang mengalir, maka semakin rendah tekanan yang diberikan, begitu pula sebaliknya.

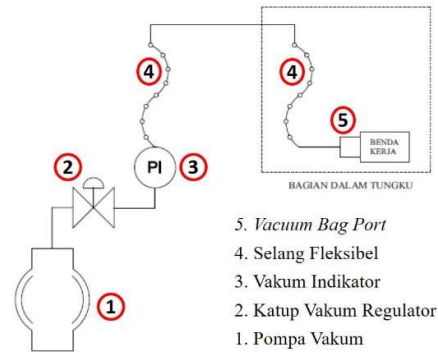
Pompa vakum dalam rancangan sistem vakum berfungsi untuk memberikan hisapan udara agar gelembung udara di dalam benda kerja keluar. Dengan menjaga putaran impeller dan jumlah udara yang dihisap. Menghitung konveksi panas yang di terima pompa selama proses pengerasan dilakukan.

Katup vakum regulator berfungsi sebagai pengatur jumlah tekanan yang mengalir dari pompa menuju benda kerja agar tetap konstan hingga proses pengerasan sempurna. Tekanan yang dibutuhkan harus tetap hingga waktu yang telah ditentukan untuk proses pengerasan panel komposit. Saya akan memilih dan menghitung jenis katup pengatur yang sesuai dengan tekanan yg ditentukan.

Indikator vakum berfungsi untuk menunjukan nilai tekanan vakum yang diberikan pompa selama proses vakum berlangsung. Penunjukan dalam inHg atau cmHg. Dalam proses penghisapan gelembung udara saya akan memilih penunjuk tekanan yang membatu pembacaan tekanan yang diberikan pompa vakum terhadap benda kerja, supaya dapat diatur oleh katup pengatur.

Vacuum bagging port berfungsi untuk membantu proses pemvakuman udara yang berada di dalam komposit.

Material yang digunakan harus tahan terhadap temperatur 100°C.



Gambar 1. Blok Fungsi Perancangan

Tahapan perancangan sistem vakum dibagi empat tahap sesuai dengan blok fungsi. Bertujuan untuk mempermudah dalam pemilihan dan perhitungan komponen.

1. Perpipaan

a. Jenis dan material pipa.

Pipa merupakan saluran tertutup sebagai sarana pengaliran atau transportasi fluida. Pemilihan jenis selang, penulis memilih jenis selang fleksibel. Selang tersebut digunakan pada saluran pneumatik, untuk menghubungkan komponen-komponen pneumatik yang satu dengan yang lain, misalnya pada tempat-tempat yang dapat terjadi getaran, sehingga fleksibilitas tersebut diperlukan.

Pemilihan material selang fleksibel yang digunakan sebagai alat pengalir fluida dari benda kerja menuju pompa adalah material teflon. Selang teflon dirancang untuk pengoperasian tekanan dan suhu yang lebih tinggi lagi. Selang ini dilapisi dengan kawat baja, yang terdapat ke seluruh bagian untuk

kekuatan dan perlindungan. Jenis selang ini dipilih karena dalam proses pengerasan komposit dengan metode *wet lay-up*, memerlukan suhu udara 100°C.

Karena temperatur 100°C akan membantu menggabungkan fiber dengan matrik lebih cepat dibandingkan dengan temperatur ruangan. Panas yang diberikan sistem pemanas pada pada ruang pemanas yang mencapai 100°C mengakibatkan selang fleksibel mendapat perlakuan panas. Oleh karena itu, material teflon merupakan pilihan yang tepat untuk kondisi seperti itu.

b. Debit aliran udara

Pemilihan pompa disesuaikan dengan debit yang dibutuhkan. Berdasarkan kecepatan fluida dan luas area yang akan dilalui fluida. Luas area berdasarkan diameter dalam dari *vacuum bagging fitting*, yang berfungsi sebagai penyambung antara selang dengan tempat panel komposit yang akan di vakum udaranya. Kecepatan udara optimal yang mengalir dalam pipa antara 20m/s samapai 30m/s, dan aliran laminar relatif jarang¹, dipilih kecepatan fluida minimum sebesar 20m/s. dan diameter dalam *vacuum bagging port* sebesar 0,00635m. perhitungan sebagai berikut:

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$A = \frac{1}{4} \times 3,14 \times (0,00635)^2$$

$$A = 0,00003165 \text{ m}^2 \approx 31,65 \text{ mm}^2$$

Debit aliran pada selang adalah:

$$Q = V \times A$$

$$Q = 20 \times 0,00003165$$

$$Q = 0,000633 \text{ m}^3/\text{s} \approx 37,98 \text{ L/min}$$

Debit aliran yang hasil perhitungan di atas digunakan sebagai pemilihan kapasitas pompa vakum yaitu sebesar sebesar 37,98 L setiap menitnya. Agar tekanan vakum yang diberikan sesuai dengan yang dibutuhkan. Pompa vakum harus dapat mengalirkan fluida (udara) sebesar yang didapat selama 1 jam sesuai dengan prosedur pengerasan panel komposit dengan metode *wet lay-up*.

c. Diameter dalam selang

Perhitungan diameter dalam selang berdasarkan debit aliran yang dihasilkan pompa dengan kecepatan aliran. Perhitungan diameter dalam selang mempengaruhi tekanan yang dialirkan oleh selang. Semakin besar luas penampang selang semakin berkurang tekanan fluida yang mengalir. Perhitungan diameter selang adalah sebagai berikut:

$$D_{in} = 1,13 \sqrt{\frac{Q}{V}}$$

$$D_{in} = 1,13 \sqrt{\frac{0,000633}{20}}$$

$$D_{in} = 0,00635 \text{ m} \approx 6,35 \text{ mm}$$

Diameter selang fleksibel yang dibutuhkan adalah 0,00635m ≈ 6,35 mm, dengan panjang yang dibutuhkan adalah

¹ Gupta, V. Gupta, S.K. (1984). *Fluid Mechanics and its Applications*, New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers.hal. 291

1,658 m dan berbahan teflon yang dapat tahan panas hingga 250°C.

d. Koefisien gaya gesek fluida

Kemudian dihitung bilangan Reynold untuk selanjutnya digunakan untuk menghitung kerugian yang terjadi pada selang fleksibel. (kinematika viskositas udara sebesar $15,68 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$Re = \frac{20 \times 0,00635D}{0,00001568}$$

$$Re = 8099,47$$

Karena bilangan reynolds yang di dapat lebih dari 4000 termasuk aliran turbulan, maka untuk menghitung besarnya koefisien gaya gesek yang terjadi pada selang fleksibel adalah:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$$

$$f = \frac{0,316}{8099,47^{0,25}}$$

$$f = 0,0333$$

Jadi koefisien gaya gesek yang terjadi di dalam selang sebear 0,0333.

e. Kerugian aliran fluida

Kerugian aliran fluida terbagi menjadi 2 yaitu: kerugian mayor dan minor. Kerugian mayor disebabkan gesekan yang terjadi pada fluida yang mengalir di dalam selang hal ini dapat menyebabkan penurunan tekanan. Kerugian mayor yang terjadi adalah:

$$h_f = f \times \frac{LV^2}{D2g}$$

$$h_f = 0,333 \times \frac{1,658 \times 20^2}{0,00635 \times 2 \times 9,8}$$

$$h_f = 178,101 \text{ m}$$

Kerugian mayor akibat aliran fluida sebesar 178,101 m, kerugian minor pada rangkaian sistem vakum adalah: kerugian akibat lekukan yang diterima selang terdapat lekukan sebesar 90° sebanyak 2 kali dan kerugian pada katup vakum regulator, dengan koefisien sebesar 0,3 kerugian pada lekukan 90° adalah sebagai berikut:

$$h_L = K_L \times \frac{V^2}{2g}$$

$$h_L = 0,3 \times \frac{20^2}{2 \times 9,8}$$

$$h_L = 6,1224 \text{ m}$$

Karena ada 2 lekukan:

$$h_L = 2 \times 6,1224$$

$$h_L = 12,244 \text{ m}$$

dengan koefisien sebesar 10 kerugian pada katup vakum regulator adalah sebagai berikut:

$$h_L = K_L \times \frac{V^2}{2g}$$

$$h_L = 10 \times \frac{20^2}{2 \times 9,8}$$

$$h_L = 204,08 \text{ m}$$

Total Kerugian kecil adalah:

$$\sum h_L = h_{lekukan} \times h_{katup}$$

$$\sum h_L = 12,244 \times 204,08$$

$$\sum h_L = 216,324 \text{ m}$$

f. Head pada pompa

Berdasarkan kerapatan aliran udara pada tekanan pada 1 atm sebesar $1,23 \text{ kg/m}^3$. Maka gaya yang terjadi pada aliran udara tersebut adalah:

$$F = \rho \times Q \times V$$

$$F = 1,23 \times 0,000633 \times 20$$

$$F = 0,0155 \text{ kgf}$$

Maka tekanan pada yang harus dihasilkan pompa adalah sebesar:

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{0,0155}{0,00003165}$$

$$P = 489,252 \text{ Pa}$$

Head pompa adalah sebesar:

$$H = \frac{P}{\rho g}$$

$$H = \frac{489,252}{1,23 \times 9,8}$$

$$H = 41,643 \text{ m}$$

Jumlah head total digunakan sebagai acuan pemilihan pompa yang sesuai dengan sistem vakum. Head total dapat dihitung dengan menjumlahkan seluruh head yang terjadi.

$$H_{total} = H_{pompa} + H_f + H_L$$

$$H_{total} = 41,643 + 178,101 + 216,324$$

$$H_{total} = 436,070 \text{ m}$$

Tekanan sistem vakum adalah:

$$H_{total} = \frac{P}{\rho g}$$

$$P = H_{total} \times \rho \times g$$

$$P = 436,070 \times 1,23 \times 9,8$$

$$P = 5118,72 \text{ Pa}$$

g. Pemilihan *Fitting* yang digunakan

Pemilihan *fitting* yang digunakan untuk penyambungan pipa fleksibel adalah *quick disconnect*. Karena *fitting* tersebut mudah untuk di lepas dan pasang kembali.

h. Pemilihan nipple

Pemilihan *nipple* digunakan untuk aliran udara, karena udara dialirkan mempunyai tekanan yang kecil tetapi kecepatannya tinggi berbeda dengan fluida pada hidrolik. Nipple yang digunakan terbuat dari kuningan seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Nipple

2. Pompa vakum

Pemilihan pompa disesuaikan dengan perhitungan kecepatan dan tekanan yaitu: 20 m/s dan tekanan yang dihasilkan $489,252 \text{ Pa}$. Berdasarkan perhitungan Jenis pompa vakum yang digunakan dalam proses pengerasan panel komposit dengan metode wet lay-

up adalah pompa jenis *rotary* (lihat gambar 3)



Gambar 3. Pompa Vakum Jenis Rotary

3. Katup Vakum Regulator

Pemilihan katup pengatur berdasarkan fluida yang dialirkan oleh pompa. Fluida yang dialirkan adalah udara vakum yang berasal dari panel komposit yang vakum udaranya oleh pompa. Jenis katup pengatur yang sesuai adalah *ball type*. Karena pengatur jumlah aliran yang mengalir dapat diatur sesuai dengan kebutuhan (lihat gambar 4)



Gambar 4. Katup Vakum Regulator

4. Indikator Vakum

Indikator berfungsi sebagai pembacaan nilai hisap yang dihasilkan oleh pompa vakum, dimana hasil hisapan berupa tekanan. Hasil tekanan yang dibutuhkan berdasarkan prosedur

dalam proses pengerasan panel komposit dengan temperatur yang digunakan adalah 100°C. Tekanan yang dihasilkan berdasarkan perbedaan tekanan antara tekanan ruangan dan tekanan yg diinginkan adalah 7,92 inHg. Pada rancangan sistem vakum digunakan pengukuran tekanan dengan batas 0-30 inHg vakum. Indikator yang digunakan khusus untuk vakum dengan satuan inHg dan cmHg (lihat gambar 5)



Gambar 5. Vakum Indikator

5. *Vacuum Bagging Port*

Untuk dapat menghisap udara yang berada di dalam kantong vakum perlu diperlukan port penghubung yang dinamakan *vacuum bagging port*. *Vacuum bagging port* dibuat menggunakan material aluminium karena dapat tahan panas hingga 100°C. pada gambar 6 merupakan *vacuum bagging port*.



Gambar 6. *Vacuum Bagging Port*

Diskusi

Uji coba rancangan dilakukan untuk mengetahui dan memastikan bahwa setiap blok fungsi memenuhi kriteria perancangan yang telah ditentukan. Adapun hasil uji coba adalah sebagai berikut:

1. Pompa Vakum, selama proses pengerasan panel komposit pompa dapat menghisap udara dengan baik (waktu pengerasan ± 1 jam) dengan tekanan hisap yang konstan sebesar 14,5 inHg walaupun terjadi kenaikan temperature sampai dengan 95° C.
2. Selang selama proses curing selang tidak mengalami perubahan bentuk dan tidak terjadi kerusakan walaupun temperature alat pengerasan panel komposit mencapai 100° C.
3. Pengatur Aliran, vakum regulator dapat diatur dan dapat mempertahankan tekanan vakum sebesar 14,5 inHg selama proses pengerasan.
4. Indikator vakum, selama proses pengerasan dapat menunjukkan nilai tekanan vakum tanpa ada fluktuasi ataupun kegagalan penunjukan.
5. *Vacuum bagging port* dapat dipasang pada nipel pasangannya dapat mengalirkan udara di dalam *vacuum bag* tanpa terjadi kebocoran walaupun terjadi kenaikan temperature di dalam alat pengerasan panel komposit sampai dengan 100° C.

Dari hasil uji coba di atas maka dapat diinterpretasikan bahwa setiap blok fungsi sudah sesuai dengan kriteria perancangan, sehingga dapat disimpulkan bahwa perancangan ini telah memenuhi tujuan perancangan yang telah disampaikan sebelumnya yaitu: memilih pompa vakum, selang

fleksibel, vakum regulator, indikator vakum dan merancang *vacuum bagging port* untuk proses pengerasan dengan metode *wet lay-up*.

Kesimpulan

Berdasarkan tahapan perancangan dan percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pompa vakum yang dipilih berjenis pompa *rotary*, dengan debit aliran pompa sebesar 37 L/min, kecepatan aliran fluida sebesar 20 m/s, luas penampang yang digunakan untuk dihubungkan dengan selang fleksibel sebesar 0,00003165 m² \approx 31,65 mm² dan head pompa yang dihasilkan 40,696 m.
2. Selang fleksibel disesuaikan dengan pompa vakum berdiameter 0,00615 m \approx 6,15 mm dengan material Teflon yang tahan hingga temperatur 250°C dan tidak mengempis saat proses vakum berlangsung.
3. Vakum regulator dipilih tipe *globe* dengan bukaan penuh yang memiliki kemampuan menjaga aliran vakum dengan tekanan rendah tetap konstan.
4. Pemilihan indikator vakum menggunakan *gauge* dengan pengukuran 0 sampai 30 inHg.
5. Perancangan *vacuum bagging port* menggunakan material aluminium untuk dapat menahan hingga temperatur 100°C. untuk material *seal* digunakan karet tahan panas.

Daftar Pustaka

- Anonymous (2001). *Resolution Performance Products*, EPON® Resin structure Reference Manual

- Anonymous (2012). *Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe*. Oklahoma City: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration
- Anonymous. *Modul 2.04, Perpindahan Panas secara Konveksi* Bandung: Departemen Teknik Kimia ITB
- Bondan, S. T., (2010). *Pengantar Material Teknik*. Jakarta: Salemba Teknika
- Buchori, L. (2004). *Buku Ajar Perpindahan Panas*. Semarang: Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Undip.
- Foreman, C. *Advance Composite*, Jappsen, USA 202
- Gupta, V. Gupta, S.K. (1984). *Fluid Mechanics and its Applications*, New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers.
- Hankel, P. *Structure and properties of engineering materials*. Singapore: McGraw-Hill Higer Education
- Khurmi, R.S., Gupta, JK. *A Text Book of Machine Design*
- Messina, JP. (1976). *Pump Handbook*. New York: McGraw-Hill Company
- Munson, B. R., *at all*. (2003). *Mekanika Fluida jilid 1*. Jakarta: Erlangga
- Parr, A. (2003). *Hidrolika dan Pneumatika edisi kedua*. Jakarta: Erlangga
- Raswari. (1987). *Perencanaan dan Perancangan Sistem Perpipaian*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Sear dan Zemansky. (2000). *Fisika Universitas*. Jakarta: Erlangga
- Soemitro, H. W. (1993). *Mekanika Fluida dan Hidraulika*: Jakarta, Erlangga,
- Syaiful, M. (2009). *Mekanisme Perpindahan Energi* Bogor: IPB Press
- White, F.M. (1994). *Mekanika Fluida edisi kedua*. Jakarta: Erlangga