

DAFTAR ISI

Daftar Isi	i
Prakata	ii

REKAYASA DAN MANUFAKTUR KOMPOSIT <i>SANDWICH</i> HIBRID UNTUK PANEL <i>Agus Hariyanto</i>	55-63
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

ANALISIS SIFAT TARIK DAN IMPAK KOMPOSIT SERAT RAMI DENGAN PERLAKUAN ALKALI DALAM WAKTU 2, 4, 6, DAN 8 JAM BERMatrik POLIESTER <i>Pramuko Ilmu Purboputro, Agus Hariyanto</i>	64-75
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

KAJI NUMERIK PENCEGAHAN PERTUMBUHAN RETAK DENGAN MENGUNAKAN METODE MODIFIKASI BENTUK <i>STOP-DRILLED HOLE</i> (SDH) <i>Yudi Dwianda, Hendery Dahlan, Meifal Rusli</i>	76-82
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

PENGARUH KOMPOSISI PEREKAT TEPUNG PADA BIOBRIKET LIMBAH BAGLOG JAMUR <i>Widodo Hadi Prabowo, Muhammad Viki Lutfiana, Rosid, dan Muhammad Burhanuddin Ubaidillah</i>	83-90
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

PERBANDINGAN KUALITAS MATERIAL BEARING MERK SKF, FMB, NKK, DAN JAL TERHADAP TERHADAP SIFAT FISIS DAN MEKANIS <i>Masryukan, Ngafwan, dan Taufik Surya Nugroho</i>	91-99
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

RANCANG BANGUN <i>MOLD</i> UNTUK PROSES <i>TERMOFORMING PROSTHETIC BELOW KNEE (B/K)</i> <i>Bambang Waluyo F., Aris Aryanto, Tri Widodo Besar R.</i>	100-110
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Waborakatuh

Ba'da salam, alhamdulillahirobbil'alamiin puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya sehingga Jurnal Media Mesin Nomor 18 Volume 2, Juli 2017 ini bisa diselesaikan dan diterbitkan. Penerbit berharap Jurnal Media Mesin dapat terus berkembang dan menjadi rujukan keilmuan di bidang Teknik Mesin di Indonesia.

Pada terbitan ini disajikan 6 tulisan yang merata pada bidang konstruksi mesin dan bahan dan bidang konversi energi. Penerbit mengucapkan terima kasih banyak kepada penulis baik dari dalam maupun dari luar Jurusan Teknik Mesin UMS yang telah berkenan menerbitkan jurnal ilmiahnya di jurnal ini. Semoga ke depannya semakin banyak penerbitan artikel-artikel dari luar Jurusan Teknik Mesin UMS.

Sebagai penutup, semoga jurnal edisi ini dapat bermanfaat dan menjadi informasi atau rujukan keilmuan di Bidang Teknik Mesin. Penerbit tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga jurnal ini dapat diterbitkan.

Wassalamu'alaikum Warohmatullohi Wabarokatuh

Surakarta, Juli 2017

Redaksi

REKAYASA DAN MANUFAKTUR KOMPOSIT SANDWICH HIBRID UNTUK PANEL

Agus Hariyanto

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A.Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartosura

Email: agus.hariyanto@ums.ac.id

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah menyelidiki pengaruh fraksi volume core terhadap peningkatan kekuatan Impak komposit sandwich hibrid berpenguat kombinasi serat rami woven dan serat gelas woven bermatrix polyester dengan core berpenguat kombinasi serbuk kayu jati dan mahoni bermatrix polyester. Mekanisme perpatahan diamati dengan foto makro.

Bahan yang digunakan untuk skin adalah serat rami (woven), serat E-Glass (woven), resin unsaturated polyester 157 BQTN (UPRs). Bahan yang digunakan untuk core adalah serbuk kayu jati dan mahoni dengan mesh 30 pada fraksi volume 30%, 40%, dan 50%, resin unsaturated polyester 157 BQTN. Hardener yang digunakan adalah MEKPO dengan konsentrasi 1%. Komposit dibuat dengan metode cetak tekan. Komposit sandwich hibrid tersusun terdiri dari dua skin komposit hibrid dengan core hibrid ditengahnya. Skin komposit hibrid sebagai lamina terdiri dari dua lamina serat gelas anyam dan satu lamina serat rami (woven - woven – woven). Fraksi volume serat komposit skin hibrid adalah 30%. Komposit core hibrid yang digunakan adalah serbuk kayu jati dan mahoni dengan mesh 30 pada fraksi volume 30%, 40%, dan 50% dengan resin unsaturated polyester 157 BQTN. Variabel utama penelitian yaitu fraksi volume core (30%, 40%, dan 50%). Spesimen dan prosedur pengujian Impak mengacu pada standard ASTM D 5942.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fraksi volume core mampu meningkatkan energi serap dan kekuatan impak komposit sandwich hibrid. Mekanisme patahan diawali oleh kegagalan komposit skin bagian tarik, core gagal geser, dan diakhiri oleh kegagalan skin sisi tekan. Pada bagian daerah batas core dan komposit skin menunjukkan adanya kegagalan delaminasi.

Kata Kunci: *komposit sandwich hibrid, kekuatan impak, fraksi volume, mekanisme patahan.*

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the effect of core's volume fraction to the increment of impact strength of sandwich hybrid composite reinforced with the combination of ramie fiber and polyester matrixed woven glass fiber with the core reinforced with the combination of teakwood powder and polyester matrixed mahony. The fracture mechanism is observed with macro photo.

Materials that are utilized for skin are ramie fiber (woven), fiber E-Glass (woven), and 157 BQTN unsaturated polyester resin (UPRs). Materials that are utilized for core are teakwood and mahony powder with 30 meshes on 30%, 40%, and 50% volume fraction

of 157 BQTN unsaturated polyester resin. Hardener which is utilized is MEKPO with 1% concentration. Composite is made by print presses method. Sandwich hybrid composite consists of two skins hybrid composite with hybrid core between them. Hybrid composite skin as lamina consists of two lamina of glass fiber woven and one lamina ramie fiber (woven- woven – woven). Volume fraction of hybrid composite skin is 30%. Hybrid cores composite which are used are teakwood and mahony powder with 30 meshes 30%, 40%, and 50% volume fraction of 157 BQTN unsaturated polyester resin. The main variable of this experiment is the volume fraction of the core (30%, 40%, and 50%). Specimen and impact examination procedure reffer on ASTM D 5942 standard.

The results show that the increment of the volume fraction of the core can increase absorb energy and impact strengness of sandwich hybrid composite. The fracture mechanism was started by the failure of the tensile part of composite's skin, followed by shear failure of the core, and ended up by the failure of compression side of the skin. On the boundary region between core and skin pointed out that there was delamination failure.

Keyword: sandwich hybrid composite, impact strength, volume fraction, fracture mechanism.

PENDAHULUAN

Munculnya *issue* permasalahan limbah *non-organik* serat sintetis yang semakin bertambah mampu mendorong perubahan *trend* teknologi komposit menuju *natural composite* yang ramah lingkungan. Serat alam mencoba menggeser serat sintetis, seperti *E-Glass*, *Kevlar-49*, *Carbon/Graphite*, *Silicone carbide*, *Aluminium Oxide*, dan *Boron*. Salah satu jenis serat alam yang tersedia secara melimpah adalah serat rami. Keuntungan penggunaan komposit antara lain ringan, tahan korosi, tahan air, *performance*-nya menarik, dan tanpa proses pemesinan. Beban konstruksi juga menjadi lebih ringan. Harga produk komponen yang dibuat dari komposit *glass fibre reinforced polyester (GFRP)* dapat turun hingga 60%, dibanding produk logam (Abdullah dan Handiko, 2000). Komposit *sandwich* hibrid merupakan salah satu jenis komposit struktur yang sangat potensial untuk dikembangkan. Komposit ini terdiri dari *flat* hibrid komposit dan *core* hibrid. *Core* yang biasa dipakai adalah *core import*, seperti *polyuretan (PU)*, *polyvynil Clorida (PVC)*, dan *honeycomb*.

Ketersediaan *serbuk kayu jati dan mahoni* yang berlimpah, merupakan SDA yang dapat direkayasa menjadi produk teknologi andalan nasional sebagai *core* hibrid komposit *sandwich* hibrid. Rekayasa *core* hibrid dapat dilakukan dari kayu utuh ataupun limbah serbuk/potongan kayu. Konsep rekayasa *core* hibrid ini merupakan tahapan alih teknologi yang diilhami oleh masuknya *core impor kayu balsa* dari Australia. Sifat fisik serbuk kayu jati dan mahoni hampir sama dengan kayu balsa.

Berdasarkan uraian tersebut, maka penelitian tentang rekayasa komposit *sandwich* hibrid dengan *core* hibrid limbah serbuk kayu jati dan mahoni merupakan kajian yang sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut. Berhubung mayoritas beban yang diterima berbagai panel komposit *sandwich* hibrid adalah bending, maka kajian mekanis yang dipandang sangat penting dilakukan adalah kajian kekuatan bending.

TINJAUAN PUSTAKA

Hariyanto meneliti pengaruh ketebalan *core* dan perlakuan alkali serat kenaf terhadap peningkatan kekuatan bending komposit *hybrid sandwich* kombinasi serat kenaf dan serat

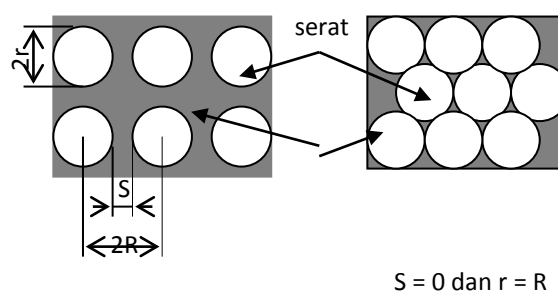
gelas bermatrix *Polyester* dengan *core* kayu sengon laut [1]. Bahan yang digunakan adalah serat kenaf (acak, anyam), serat *E-Glass* (anyam), *resin unsaturated polyester 157 BQTN (UPRs)*, kayu sengon laut, dan *NaOH* teknis. *Hardener* yang digunakan adalah *MEKPO* dengan konsentrasi 1%. Variabel utama penelitian yaitu perlakuan alkali serat kenaf (0 & 2 jam) dan tebal *core* (5, 10, 15, 20 mm). Komposit dibuat dengan metode cetak tekan. Fraksi volume serat komposit adalah 30%. Pengujian komposit sesuai dengan standar *ASTM* yang digunakan pengujian bending yang mengacu pada standar *ASTM C 393-00*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ketebalan *core* mampu meningkatkan kekuatan bending dan momen bending komposit *hybrid sandwich*. Perlakuan alkali pada serat kenaf menurunkan kekuatan bending pada komposit *hybrid sandwich*. Mekanisme patahan diawali oleh kegagalan komposit *skin* bagian tarik, *core* gagal geser, dan diakhiri oleh kegagalan *skin* sisi tekan. Pada bagian daerah batas *core* dan komposit *skin* menunjukkan adanya kegagalan delaminasi.

Sifat Mekanis Komposit *Sandwich*

Wahyanto dan Diharjo menyimpulkan bahwa komposit *sandwich* serat gelas acak 300 gr/m² pada $V_f = 30\%$ bermatrik *polyester* dengan *core* kayu sengon laut setebal 10 mm memiliki kekuatan bending dan impak 125,44 MPa dan 0,045 Mpa [2]. Menurut Febrianto dan Diharjo pada komposit hibrid *sandwich* serat *E-glass* acak 300 gr/m² dan kenaf anyam 810 gr/m² pada $V_f = 30\%$ bermatrik *polyester* dengan *core* kayu sengon laut setebal 10 mm, kekuatan bending dengan *core* arah serat kayu horisontal adalah 263,28 MPa, lebih besar 81% di atas komposit *sandwich* hibrid dengan *core* kayu vertikal 97,5 Mpa [3]. Kekuatan impak komposit *sandwich* dengan *core* vertikal 0,0604 J/mm², lebih besar 4,4% di atas kekuatan impak dengan *core* arah serat kayu horisontal 0,0578 J/mm².

Aspek Geometri

Menurut Gibson penempatan serat harus mempertimbangkan geometri serat, arah, distribusi, dan fraksi volume, agar dihasilkan komposit berkekuatan tinggi [4]. Untuk suatu lamina *unidirectional*, dengan serat kontinu dengan jarak antar serat yang sama, dan direkatkan secara baik oleh matrik, seperti ditunjukkan pada gambar 1. Fraksi volume dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [5]:



$$V_f = \frac{\pi}{4} \left[\frac{r}{R} \right]$$

$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left[\frac{r}{R} \right]^2$$

Gambar 1 Struktur mikro komposit dengan peletakan serat teratur [4].

$$V_1 = \frac{W_1 / \rho_1}{W_1 / \rho_1 + W_2 / \rho_2 + \dots} \quad (1)$$

$$W_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots} \quad (2)$$

dengan catatan :

V_1, V_2, \dots = fraksi volume, (%)

W_1, W_2, \dots = fraksi berat, (%)

ρ_1, ρ_2, \dots = densitas bahan pembentuk, (gr/Cm³)

Kekuatan komposit dapat ditentukan dengan persamaan [5]:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3)$$

Kekuatan Impak Komposit *Sandwich*

Pada umumnya, material komposit mempunyai nilai impact dan energi serap. Akibat pengujian impact, pada bagian sisi kanan spesimen mengalami tekanan, dan bagian sisi kiri mengalami tarikan. Kegagalan yang terjadi akibat uji impact komposit yaitu mengalami patah pada bagian sisi kiri karena tidak mampu menahan tegangan tarik. Kekuatan impact komposit dapat ditentukan dengan persamaan (4) [6]:

$$a_{cu} = \frac{W}{h \times b} \times 10^3 = \frac{W}{h \times b} \quad (4)$$

Energi serap dapat ditentukan dengan persamaan (5) [6]:

$$W = G \times R (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (5)$$

Mode Kegagalan Impact Komposit *Sandwich*

Hillger mengemukakan bahwa ada beberapa macam tipe kerusakan pada pengujian impact yang dapat dideteksi seperti: retak, delaminasi pada *skin*, *debonding* antara *skin* dan *core*, serta kerusakan di dalam *core* [7]. Luas kerusakan impact pada struktur *sandwich* dipengaruhi oleh material *core* dari tumpukan laminasi permukaan *sandwich*, ukuran, massa, kecepatan pendulum dan kemampuan dari komponen *sandwich* untuk menyerap beban kejut. Pada struktur *sandwich* dengan *core*, delaminasi dapat dideteksi pada daerah terimpak yang berada di antara *skin* dan *core*. Macam-macam kerusakan akibat beban impact ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Kerusakan pada struktur sandwich akibat beban impact [7]

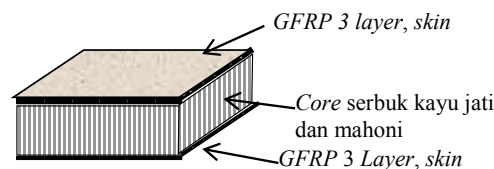
METODOLOGI PENELITIAN

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama penelitian adalah *serat rami (woven)* dengan *density* 1.6 gr/m³, *serat E-Glass (woven)* dengan *density* 450 gr/m², bahan *core* serbuk kayu jati dan mahoni pada *mesh* 30 dengan *density* 0.68 gr/m³ dan 0.62 gr/m³, *unsaturated poliester type 157 BQTN*, dan *hardener MEKPO* dengan kadar 1%. Peralatan yang digunakan adalah Mesin uji impact *Charpy*, timbangan untuk menentukan fraksi volume serat foto makro, *oven pengering*, *press mold*.

Pembuatan Spesimen Uji

Spesimen uji komposit *sandwich* hibrid dibuat dengan metode *press mold*. Fraksi volume serat lamina komposit hibrid/ *skin* bagian ditentukan 30%, yang dikontrol dengan ketebalan komposit *sandwich* hibrid saat pencetakan. Komposit *sandwich* hibrid tersusun dari dua *skin* komposit hibrid dengan *core* hibrid *serbuk kayu jati dan mahoni* di bagian tengahnya. Lamina komposit hibrid tersusun dari 2 lamina serat *E-glass woven* dan 1 lamina serat rami *woven*. Posisi serat *E-glass* ditempatkan pada sisi terluar yang menerima beban lebih berat. Serat rami yang digunakan terdiri dari serat tanpa perlakuan. *Core* hibrid serbuk kayu jati dan mahoni dibuat dengan metode *press mold*. Fraksi volume *core* divariasikan 30%, 40%, dan 50% ditunjukkan seperti pada gambar 3.

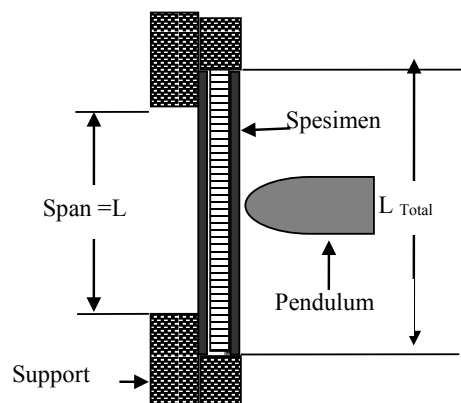


Gambar 3. Komposit *sandwich* hibrid [8]

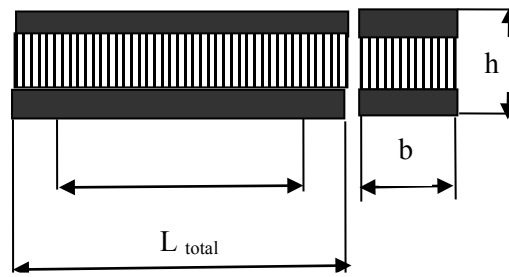
Agar hasil penelitian lebih komprehensif, maka komponen penyusun komposit *sandwich hibrid* juga dilakukan uji impact. Pembuatan spesimen ini dilakukan tersendiri dengan mengacu standar *ASTM D 5942* (untuk impact komposit *sandwich*).

Metode Pengujian Spesimen Uji

Berhubung aplikasi komposit *sandwich* hibrid adalah untuk *panelling/kereta api, bis*, maka pengujian yang penting dilakukan adalah uji impact. Pengujian impact dilakukan menurut standar *ASTM D 5942*. ditunjukkan pada gambar 4 dan 5 untuk Pemasangan spesimen uji impact (*flat wise impact*) dan spesimen uji impact *charpy*.



Gambar 4. Pemasangan spesimen uji impact (Flat wise Impact)



Gambar 5. Spesimen uji impact Charpy

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Analisis Kekuatan Impact

Tabel 1

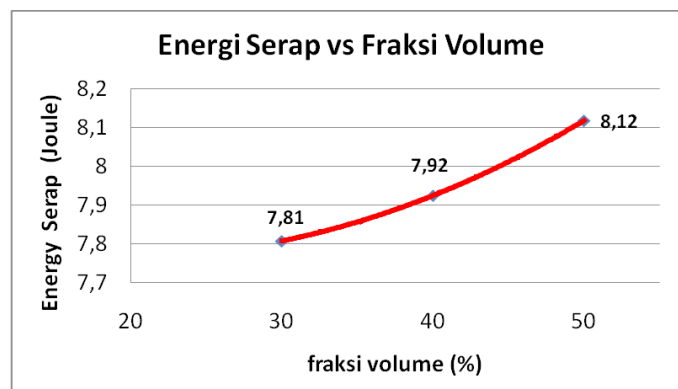
Energi serap komposit sandwich hibrid	
Fraksi Volume (%)	Energi Serap W(Joule)
30	7.81
40	7.92
50	8.12

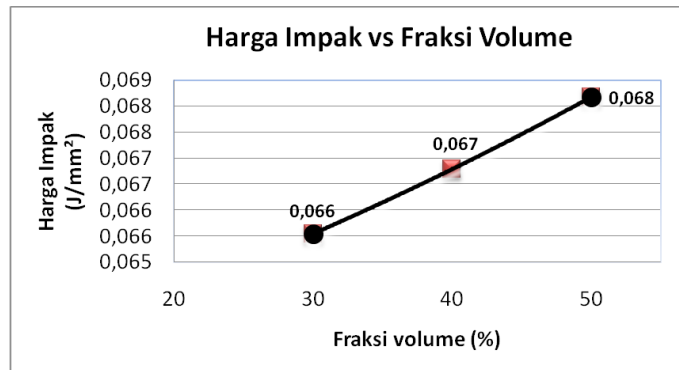
Tabel 2

Kekuatan impact komposit sandwich hibrit	
Fraksi Volume (%)	Kekuatan Impact a_{cu} (J/mm ²)
30	0.066
40	0.067
50	0.068

Komposit *sandwich* hibrid yang diperkuat serat rami dan *E-Glass* tanpa perlakuan mampu menyerap energi yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada tabel 1. Energe serap meningkat seiring dengan penambahan fraksi volume *core*, seperti ditunjukkan pada gambar 6. Dengan demikian, penambahan bagian inti struktur *sandwich hibrid* menunjukkan secara signifikan peningkatan kemampuan menyerap energi. Sifat material yang lebih lunak (*core* hibrid serbuk kayu jati dan mahoni) dan penambahan fraksi volume menyebabkan memiliki kemampuan menyerap energi yang lebih tinggi.

Bila ditinjau dari segi kekuatan impact seperti ditunjukkan pada gambar 7, kekuatan impact komposit *sandwich* hibrid meningkat secara signifikan seiring dengan penambahan ketebalan *core*. Kekuatan impact *optimum* pada fraksi volume *core* 50 %.

Gambar 6 Kurva energy serap komposit *sandwich* hibrid.



Gambar 7 Kurva kekuatan impak komposit *sandwich* hibrid.

Berdasarkan analisis yang dihitung dengan standar *ASTM D 5942*, komposit *sandwich* hibrid yang diperkuat serat rami dan *E-Glass* tanpa perlakuan, memiliki kekuatan impak yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada gambar 7. Hal yang sama menunjukkan bahwa energi serap yang paling optimum terjadi pada komposit *sandwich* hibrid dengan fraksi volume *core* 50 %.

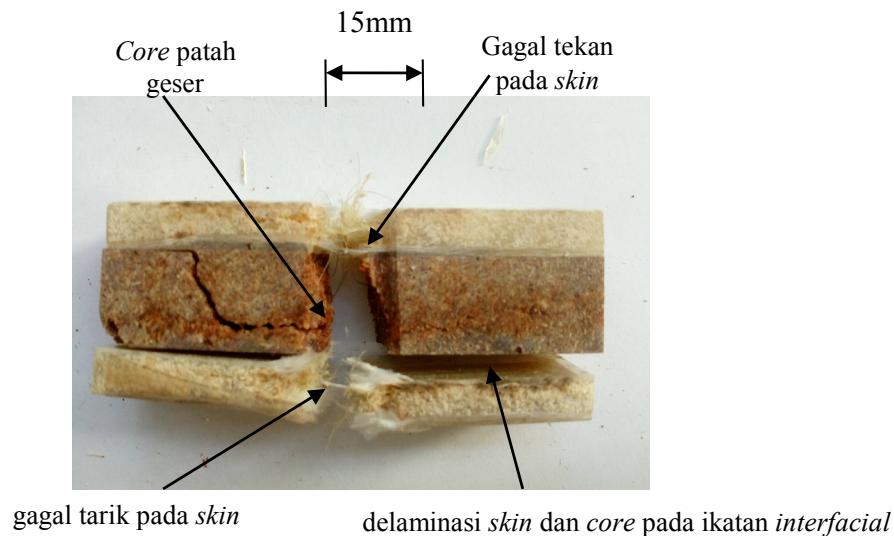
Analisis Pola Kegagalan



Gambar 8 Permukaan patah komposit *sandwich* hibrid pada $V_f = 30\%$



Gambar 9. Permukaan patah komposit *sandwich* hibrid pada $V_f = 40\%$



Gambar 10. Penampang patahan komposit *sandwich* hibrid pada $V_f = 50\%$

Kegagalan impak komposit *sandwich* hibrid ditunjukkan pada gambar 8, 9, dan 10. Secara umum, pola kegagalan diawali dengan retakan pada komposit *skin* yang menderita tegangan tarik. Kemudian, beban impak tersebut didistribusikan pada *core* sehingga menyebabkan *core* mengalami kegagalan. *Skin* yang semula menderita beban tekan akhirnya mengalami kegagalan seiring dengan gagalnya *core*. Gambar 10 menunjukkan secara jelas adanya kegagalan tarik pada komposit *skin* bawah, gagal geser *core* dan kegagalan tekan pada *skin* atas. Mekanisme patahan terjadi karena kegagalan komposit *sandwich* hibrid akibat beban bending berawal dari *skin* komposit sisi belakang (bawah) dan dilanjutkan dengan kegagalan *core*, delaminasi *skin* dan *core* pada ikatan *interfacial*.

KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil penelitian tersebut maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan fraksi volume *core* pada 30% hingga 50% pada komposit *sandwich hybrid* meningkatkan energi serap sebesar 7.81 hingga 8.12 Joule. Harga yang optimum pada fraksi volume *core* 50% sebesar 8.12 Joule.
2. Penambahan fraksi volume *core* pada 30% hingga 50% pada komposit *sandwich hybrid* meningkatkan kekuatan impak sebesar 0.066 menjadi 0.068 Joule/mm². Harga yang optimum pada fraksi volume *core* 50 % sebesar 0.068 Joule/mm².
3. Tahapan pola kegagalan komposit *sandwich* hibrid adalah kegagalan tarik *skin* komposit sisi bawah, kegagalan geser *core*, delaminasi *skin* komposit sisi atas dengan *core*, kegagalan *skin* komposit sisi atas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hariyanto, A., 2006. *Studi Perlakuan Alkali dan Tebal Core Terhadap Sifat Bending dan Impak Komposit Hybrid Sandwich Serat Kenaf dan Gelas Bermatrik Polyester dengan Core Kayu Sengon Laut*, Tesis. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- [2] Wahyanto, B, Diharjo, K, 2004, *Karakterisasi Uji Bending Dan Impak Komposit Sandwich GRFP dengan Core Kayu Sengon Laut*, Skripsi, UNS, Surakarta.

- [3] Febrianto, B, Diharjo, K, 2004, *Kekuatan Bending dan Impak Komposit Hibrid Sandwich Kombinasi Serat Karung Goni dan Serat Gelas Polyester dengan Core Kayu Sengon Laut*, Skripsi, UNS, Surakarta.
- [4] Gibson, O. F., 1994. *Principle of Composite Materials Mechanics*, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- [5] Shackelford, 1992. *Introduction to Materials Science for Engineer*, Third Edition, MacMillan Publishing Company, New York, USA.
- [6] Annual Book of Standards, Section 8, D 5942-96, *Standard Test Methods for Determining Charpy Impact Strength of Plastics*, ASTM, 1996.
- [7] Hillger, 1998, *Inspection of CFRP and GFRP Sandwich Components*, Wilhelm Raabe Weg 13, D-3 8110 Braunschweig.
- [8] Allen, H.G., 1969, *Analisis and design of structural sandwich Panels*, Pergamon press.
- [9] *Annual Book of Standards, Section 8, D 790-02, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials1"*, ASTM, 2002.

ANALISIS SIFAT TARIK DAN IMPAK KOMPOSIT SERAT RAMI DENGAN PERLAKUAN ALKALI DALAM WAKTU 2, 4, 6, DAN 8 JAM BERMATRIK POLIESTER

Pramuko Ilmu Purboputro, Agus Hariyanto

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A.Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartasura

Email: pip272@ums.ac.id

ABSTRAK

Ikatan interfacial bonding pada komposit serat alam sangat tergantung dari kekasaran permukaan serat. Permukaan serat dapat ditingkatkan daya ikatan permukaannya dengan cara mencelupkan pada larutan alkali. Pencelupan ini akan mengurangi lapisan lignin yang mengurangi kekuatan ikat pada permukaan serat. Pada penelitian ini proses yang digunakan adalah perlakuan alkali terhadap permukaan serat dengan cara merendam serat rami selama 2,4,6, dan 8 jam. Larutah alkali yang digunakan adalah larutan NaOH dengan konsentrasi 10% pada pelarut air. Serat rami Boehmeria nivea (L) Goud direndam pada larutan NaOH selama 2, 4, 6, dan 8 jam perendaman, untuk menghilangkan zat ligninnya agar kekuatan ikatan permukaan bisa diperbaiki. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian tarik dan pengujian impak. Hasil yang didapat adalah kekuatan tarik terbesar didapat pada perendaman 8 jam yaitu sebesar 41,9 MPa. Modulus young terbesar didapat pada perendaman 2 jam, yaitu 2743,15 Mpa, dan kekuatan impak terbesar adalah 0,0725 Joule/mm² terjadi pada perendaman 4 jam.

Kata kunci: komposit serat, kekuatan tarik, kekuatan impak, perendaman alkali

ABSTRACT

The interfacial bonding of natural fiber composites are highly dependent on the roughness of the fiber surface. The surface of the fiber can be enhanced its surface bonding power by dipping in an alkaline solution. This dipping will reduce the lignin layer which reduces the binding strength on the fiber surface. In this study, the used process is the alkali treatment of the surface of the fiber by immersing the ramie fiber for 2, 4, 6, and 8 hours. This study used NaOH solution with a concentration of 10% in water solvent as Alkali solution. Ramie fiber Boehmeria nivea (L) Goud is soaked in a solution of NaOH for 2,4,6, and 8 hours of soaking, to remove lignin substances so the surface bond strength can be improved. The performed tests are tensile and impact test. The result is the greatest tensile strength is obtained by 8 hours immersion which is equal to 41.9 MPa. The biggest modulus is obtained by 2 hours immersion (2743.15 Mpa) and the biggest impact strength was 0.0725 Joule/mm² occurred at 4 hours immersion.

Keywords: fiber composite, tensile strength, impact strength, alkali immersion

PENDAHULUAN

Penggunaan dan pemanfaatan material komposit sekarang ini semakin berkembang, seiring dengan meningkatnya penggunaan bahan tersebut yang semakin meluas mulai dari yang sederhana seperti alat-alat rumah tangga sampai sektor industri baik industri skala kecil maupun industri skala besar. Komposit mempunyai keunggulan tersendiri dibandingkan dengan bahan teknik alternatif lain seperti kuat, ringan, tahan korosi, ekonomis dan sebagainya.

Tanaman rami yang dikenal dengan nama latinnya *Boehmeria nivea* (L) Goud merupakan tanaman tahunan berbentuk rumpun yang dapat menghasilkan serat alam nabati dari pita (*ribbons*) pada kulit kayunya yang sangat keras dan mengkilap. Tanaman rami adalah tanaman tahunan yang berbentuk rumpun mudah tumbuh dan dikembangkan di daerah tropis, tahan terhadap penyakit dan hama, serta dapat mendukung pelestarian lingkungan. Dalam hal tertentu serat rami mempunyai keunggulan dibandingkan serat yang lainnya seperti kekuatan tarik, daya serap terhadap air, tahan terhadap kelembapan dan bakteri, tahan terhadap panas serta peringkat nomor dua setelah sutra dibandingkan serat alam yang lainnya dan lebih ringan dibanding serat sintetis dan ramah lingkungan.

Dari pertimbangan tersebut maka penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan data tentang kemampuan fisis dan mekanis berupa kekuatan tarik, dan kekuatan *impact* dari serat rami menggunakan matrik *polyester* dengan perlakuan alkali (NaOH) serta dibuat dengan *hand lay up*.

Tujuan dari perlakuan alkali adalah untuk menghilangkan lapisan lignin yang ada di permukaan serat. Dengan menghilangkan lapisan lignin pada permukaan diharapkan ikatan permukaan antar permukaan serat rami dengan matriks akan lebih kuat. Pengambilan waktu pencelupan 2, 4, 6, 8 jam adalah suatu pendekatan waktu yang masih bisa direalisasikan, apabila komposit ini benar-benar akan dibuat secara massal. Selain itu pengambilan waktu tersebut adalah dengan konsentrasi 10% NaOH dengan waktu minimal 2 jam akan diperoleh reaksi pada permukaan serat yang cukup.

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan di atas, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah: apakah sifat fisis dan mekanis dari material komposit serat rami dengan matriks polyester, dengan panjang serat yang berbeda-beda dapat dimanfaatkan sebagai bahan teknik nonmetal yang digunakan sebagai bahan alternatif. Proses pembuatan dengan cara *hand lay up* dengan penekanan secara manual menggunakan kaca sebagai cetakan dan penekanan yang terbuat dari plat besi.

Pengujian komposit yang dilakukan berupa uji kekuatan tarik, uji kekuatan impak, dan foto patahan struktur makro, foto struktur mikro. Hal ini dilakukan karena produk komposit bisa dibuat sebagai partisi, atau meja/bangku atau *casing* yang sangat relevan terhadap beban impak dan beban tarik-tekan. Struktur makro dan mikro, untuk mengetahui kecenderungan fenomena perpatahan apa yang mungkin terjadi.

TINJAUAN PUSTAKA DAN TEORI

Komposit yang merupakan penggabungan dua atau lebih material secara makro sekarang ini penggunaannya semakin meningkat seiring dengan banyaknya penelitian yang dilakukan untuk memperbanyak variasi dan pemanfaatannya. Tujuan utama adanya penggabungan dalam bidang *engineering* yaitu hasil dari penggabungan itu harus dapat diaplikasikan untuk mengatasi permasalahan yang berkembang saat ini atau paling tidak harus sesuai dengan kebutuhan perencanaan suatu komponen struktur.

Komposit terdiri dari dua atau lebih material berbeda yang bergabung sebagai suatu kombinasi yang menyatu. Jadi, beton bertulang merupakan komposit yang terbuat dari batang baja di dalam suatu matriks beton. Sama halnya, berbagai badan suatu perahu layar dibuat

dari plastik yang diperkuat serat (FRP), di mana serat biasanya adalah gelas dan plastiknya umumnya adalah poliester [1]. Komposit lainnya menjadi produk seperti baja berlapis-gelas untuk kompor dapur dan motor roket dengan serat aramid yang disusun dengan cermat sebagai penguat (Lawrence H. Van Vlack) [2]. Pada penelitian kali ini digunakan komposit berpenguat serat rami untuk digunakan sebagai bahan *spare part* dan perlengkapan balap karena selain kuat dan tahan pecah juga mudah dicari bahan-bahan tersebut.

Ray *et al.* (2001) melakukan perlakuan serat jute dengan larutan alkali 5% selama 0, 2, 4, 6, 8 jam yang dilanjutkan dengan pencucian dan penetralan alkali dengan asam asetat, serta pengeringan pada temperatur kamar selama 48 jam dan di oven pada suhu 100^o C selama 6 jam. Reduksi berat serat terjadi selama perendaman NaOH hingga 2 jam, setelah itu berat serat relatif konstan. Perkembangan kristalinitas serat jute meningkatkan modulus elastisitasnya sebesar 12%, 68%, dan 79% setelah perlakuan alkali selama 4, 6, 8 jam.

Bahan Matriks

Plastik, serat, film, dan sebagainya yang biasa digunakan dalam kehidupan sehari-hari, mempunyai berat molekul di atas 10.000. Bahan dengan berat molekul yang besar itu disebut polimer, mempunyai sifat-sifat dan struktur yang rumit, disebabkan oleh jumlah atom pembentuk yang jauh lebih besar dibandingkan dengan senyawa yang berat atomnya rendah. Matrik yang digunakan dalam komposit adalah harus mampu meneruskan beban sehingga serat harus bisa melekat pada matrik dan kompatibel antara serat dan matrik artinya tidak ada reaksi yang mengganggu.

Serat

Serat atau *fiber* dalam bahan komposit berperan sebagai bagian utama yang menahan beban, sehingga besar kecilnya kekuatan bahan komposit sangat tergantung dari kekuatan serat pembentuknya. Semakin kecil bahan (diameter serat mendekati ukuran kristal) maka semakin kuat bahan tersebut, karena minimnya cacat pada material.

Tabel 1 Beberapa sifat-sifat serat baik *natural fibre* maupun *sintetis fibre* [3]

Jenis/Sifat	Berat Jenis
Kapas	1,54 gr/cm ³
Wol	1,32 gr/cm ³
Rayon	1,50 – 1,52 gr/cm ³
Kevlar	1,44 gr/cm ³
Sutra	1,33 – 1,45 gr/cm ³
Vinilon	1,26 – 1.30 gr/cm ³
Gelas (Jenis E)	2,54 gr/cm ³
Nilon 66	300 - 502 gr/cm ³

Bahan Tambahan

Bahan tambahan utama adalah katalis (*hardener*). Katalis berfungsi memulai dan mempersingkat reaksi *curing* (mengeraskannya cairan resin). Semakin banyak katalis reaksi *curing* akan semakin cepat, tetapi kelebihan katalis juga akan menimbulkan panas pada saat *curing* dan bisa merusak produk yang dibuat, yaitu menjadikan bahan komposit getas/rapuh. Oleh karena itu pemberian katalis dibatasi kira-kira 1%-2% dari berat resin.

Perlakuan Alkali (NaOH)

Sifat alami serat adalah *hyrophilic*, yaitu suka terhadap air berbeda dari polimer yang *hidrophilic*. Pengaruh perlakuan alkali terhadap sifat permukaan serat alam selulosa telah diteliti dimana kandungan optimum air mampu direduksi sehingga sifat alami *hidropholic* serat dapat memberikan ikatan *interfecial* dengan matrik secara optimal (Bismarck *et al.* 2002).

Salah satu indikator yang digunakan untuk menunjukkan kebasaaan adalah lakmus merah. Bila lakmus merah dimasukkan ke dalam larutan basa maka berubah menjadi biru.

Kekuatan *Impact* [4, 5]

$$E_{\text{serap}} = G \times R (\text{Cos } \beta - \text{Cos } \alpha) \quad (1)$$

Dimana:

- G = Berat beban/pembentur (N)
 R = Jari-jari putar ke titik berat pembentur (m)
 E_{serap} = Energi yang terserap (J)

$$HI = \frac{E_{\text{serap}}}{A} \quad (2)$$

Dimana:

- HI = harga impak (J/mm²)
 E_{serap} = Energi yang terserap (J)
 A = Luas di bawah takik (mm²)

Kekuatan Tarik

Besarnya nilai modulus elastisitas komposit yang juga merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan pada daerah proporsional dapat dihitung dengan persamaan:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3)$$

Dimana:

- E = Modulus elastisitas tarik (MPa)
 σ = Kekuatan tarik (MPa)
 ε = Regangan (mm/mm)

Besarnya regangan adalah jumlah pertambahan panjang karena pembebanan dibandingkan dengan panjang daerah ukur (*gage length*). Nilai regangan ini adalah regangan proporsional yang didapat dari garis. Proporsional pada grafik tegangan-regangan hasil uji tarik komposit.

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (4)$$

Dimana:

- ΔL = pertambahan panjang (mm)
 L = panjang daerah ukur (*gage length*), mm

TUJUAN PENELITIAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui kekuatan tarik, dan kekuatan *impact* dari komposit serat rami dengan perlakuan alkali selama 2, 4, 6, dan 8 jam.
2. Meneliti jenis-jenis patahan yang dihasilkan dari pengujian tarik dan pengujian *impact*.
3. Sebagai acuan baru untuk mengembangkan bahan komposit yang lain.
4. Untuk mengetahui foto makro pada jenis/bentuk patahan dan melihat foto struktur mikro penampang bahan uji.

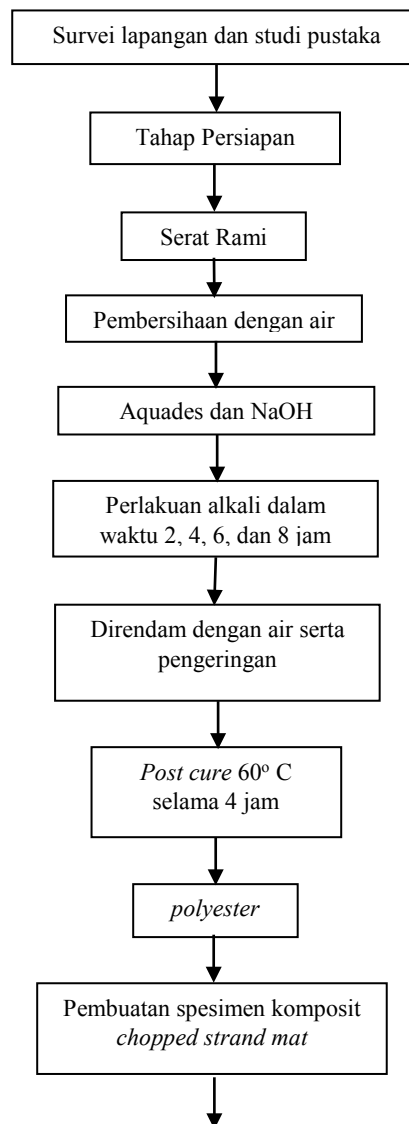
Manfaat Penelitian

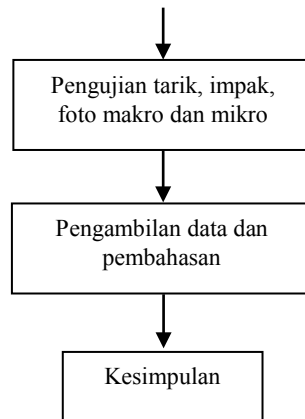
Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan inspirasi dan menjadi:

1. Acuan akan lahirnya penelitian berikutnya.
2. Untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan industri.
3. Mengetahui sifat fisis dan mekanis.

METODOLOGI DAN PELAKSANAAN PENGUJIAN

Diagram Alir





Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penyiapan Pembuatan Benda Uji

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Serat rami
Tali tambang yang terbuat dari rami yang masih baru diurai satu per satu seratnya, kemudian diambil seratnya dengan cara menggunakan sisir, dicuci, dan dikeringkan. Serat tersebut lalu dipotong 60 mm kemudian serat tersebut direndam dalam NaOH selama 2, 4, 6, dan 8 jam.
2. *Polyester*
Terdiri dari dua jenis resin (1kg) dan katalis (200ml). Matrik yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis polyester yaitu polyester 108 yang berwarna bening dan katalis yang digunakan adalah MEKPO (*metil etil keton peroksida*).
3. NaOH
NaOH digunakan untuk menghilangkan lignin pada serat dengan kadar 5% NaOH.
4. Timbangan digital, untuk menimbang serat serabut rami dan resin polyester digunakan timbangan digital mini seri M200 (max 200gr).
5. Cetakan benda uji cetakan yang digunakan terbuat dari kaca dengan ketebalan 4mm.
6. Alat bantu lain berupa gelas ukur, penggaris, *cutter*, kit mobil, lem castol, sendok, pisau.

Pengujian Spesimen

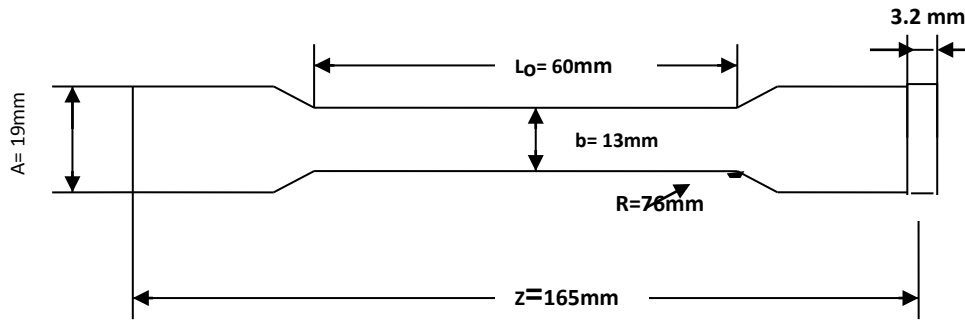
Pengujian spesimen yang dilakukan meliputi uji tarik (ASTM D 638 – 03) dan uji impact (ASTM D 256 - 03) [6], pengamatan struktur makro patahan setelah uji tarik dan pengamatan struktur mikro pada patahan uji *impact*.

Pengujian Komposit

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini antara lain pengujian tarik, pengujian impact, dan foto makro patahan, dan struktur mikro.

Pengujian Tarik

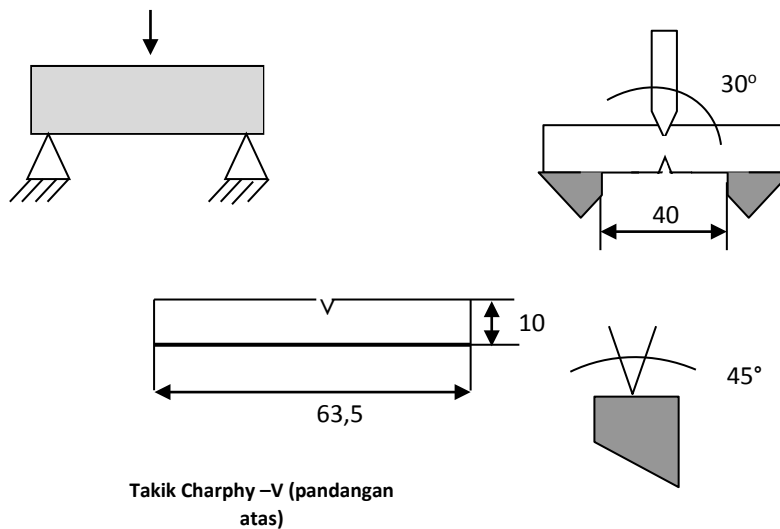
Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui besarnya kekuatan tarik dari bahan komposit. Pengujian dilakukan dengan mesin uji “*Universal Testing Machine*”. Spesimen pengujian tarik dibentuk menurut standar ASTM D 638-03 yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. Dimensi benda pengujian tarik ASTM D 638 – 03 [6]

Pengujian Impact

Untuk mengetahui ketahanan benda terhadap keadaan patah, maka digunakan metode pengujian *impact charphy*. Batang uji *charphy* mempunyai luas penampang lintang bujur sangkar (10×10) dengan takikan berbentuk V-45° dengan kedalaman takik 2 mm.



Gambar 3. Dimensi spesimen pengujian impact ASTM D 256 – 03 [6]

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan membuat spesimen yang disesuaikan dengan standar pengujian tarik ASTM 638-03.

Tabel 2. Data dimensi spesimen untuk pengujian tarik serat rami

Jenis Komposit	No Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Panjang Awal (mm)	Luas (mm ²)
Perlakuan alkali selama 2 jam	1	13	6	60	780
	2	13	6	60	780
	3	13	6	60	780
Perlakuan alkali selama 4 jam	1	13	6	60	780
	2	13	6	60	780
	3	13	6	60	780

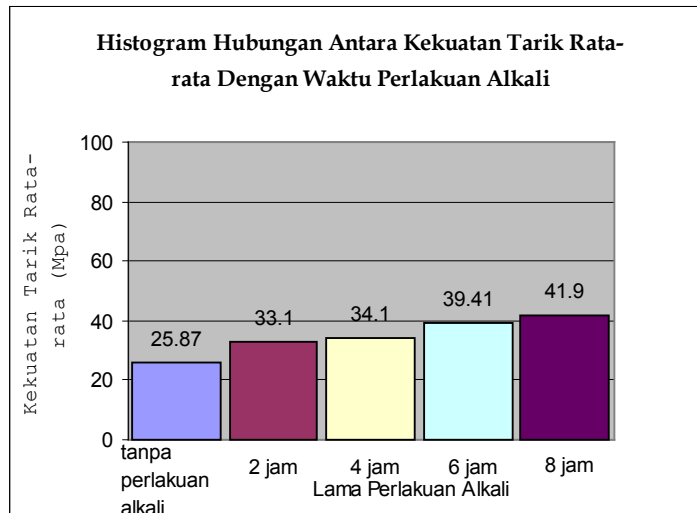
Perlakuan alkali selama 6 jam	1	13	6	60	780
	2	13	6	60	780
	3	13	6	60	780
Perlakuan alkali selama 8 jam	1	13	6	60	780
	2	13	6	60	780
	3	13	6	60	780

Tabel 3 Hasil pengujian tarik komposit serat rami tanpa perlakuan alkali

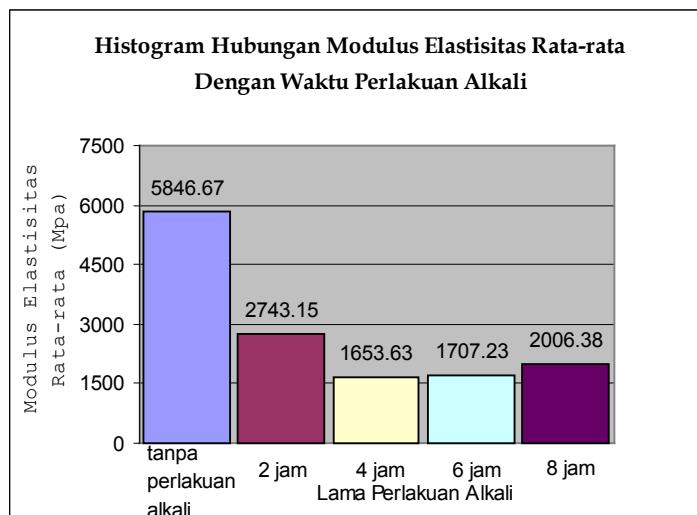
Jenis Komposit	No Spesimen	Kekuatan Tarik (σ) (Mpa)	Kekuatan Tarik Rata-Rata (Mpa)	Regangan (ϵ)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Modulus Elastisitas Rata-Rata (Mpa)
Panjang Serat 50 mm	1	24.70		0.005	4940	
	2	26.40	25.87	0.0042	6285.71	5846.67
	3	26.52		0.0042	6324.3	

Tabel 4 Hasil pengujian tarik komposit serat rami

Jenis Komposit	No Spesimen	Kekuatan Tarik (σ) (Mpa)	Kekuatan Tarik Rata-Rata (Mpa)	Regangan (ϵ)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Modulus Elastisitas Rata-Rata (Mpa)
Perlakuan alkali selama 2 jam	1	24.56		0.90	27.29	
	2	34.53	33.1	0.70	49.05	2743.15
	3	39.95		0.049	8153.1	
Perlakuan alkali selama 4 jam	1	36.80		0.0205	1795.1	
	2	31.95	34.1	0.0238	1342.4	1653.63
	3	33.55		0.0184	1823.4	
Perlakuan alkali selama 6 jam	1	36		0.0216	1666.7	
	2	39.73	39.41	0.0294	1351.4	1707.23
	3	42.50		0.0202	2103.9	
Perlakuan alkali selama 8 jam	1	42.56		0.0227	1878.8	
	2	42.52	41.9	0.0212	1992.9	2006.38
	3	40.80		0.019	2147.4	



Gambar 4 Histogram hubungan antara kekuatan tarik rata-rata dengan waktu perlakuan alkali



Gambar 5 Histogram hubungan antara modulus elastisitas rata-rata dengan waktu perlakuan alkali

Dari data-data yang telah diperoleh tersebut komposit dengan serat rami dengan perlakuan alkali selama 2, 4, 6, dan 8 mempunyai kekuatan tarik rata-rata masing-masing, yaitu 33.01 Mpa, 34.1 Mpa, 39.41 Mpa, dan 41.9 Mpa. Dan serat tanpa perlakuan alkali mempunyai kekuatan tarik rata-rata sebesar 25.87 Mpa. Jadi dapat disimpulkan bahwa kekuatan tarik untuk komposit serat rami dengan perlakuan alkali 8 jam lebih tinggi dibandingkan dengan komposit serat rami tanpa perlakuan alkali. Hal ini disebabkan karena serat yang sudah dialkali akan mengembang oleh alkali dan kekuatan tidak menurun yang mempengaruhi kekuatan tarik, dan juga ikatan serat dan matrik semakin kuat.

Pada data pengujian tarik komposit serat rami menunjukkan bahwa komposit dengan perlakuan alkali dalam waktu 2 jam mempunyai modulus elastisitas rata-rata paling tinggi, yaitu sebesar 2743.15 MPa, dan terkecil pada komposit dengan perlakuan alkali selama 4 jam, yaitu sebesar 1653.63 MPa. Agar material penguat menanggung sebagian besar beban, penguat harus memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi dari pada matriknya (Lawrence H Van Vlack).

Pengujian *Impact*

Untuk spesimen komposit untuk masing-masing spesimen komposit yaitu serat serabut kelapa dengan panjang 60 mm dengan perlakuan alkali selama 2, 4, 6, dan 8 jam mengacu pada standar ASTM D256-03.

Tabel 5 Data dimensi spesimen uji *impact* komposit serat rami

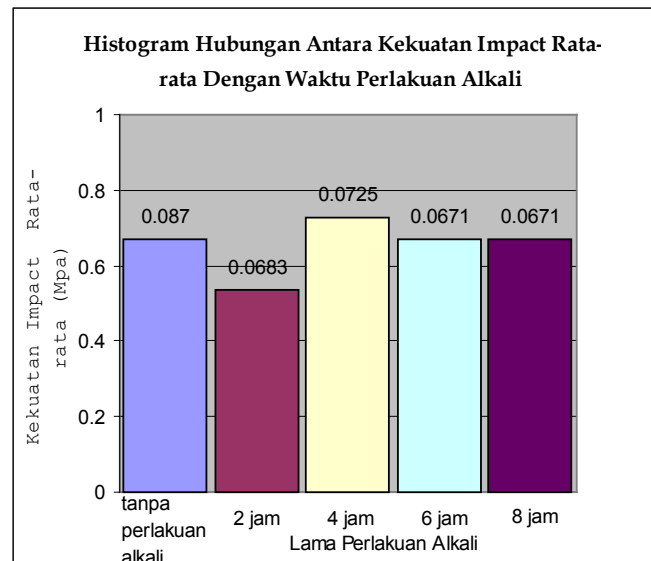
Jenis Komposit	No Spesimen	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Kedalaman Takik (mm)	Tinggi Bawah Takik (mm)	Penampang Bawah Takik (mm ²)
Perlakuan alkali selama 2 jam	1	9.8	10	2	8	78.4
	2	10	10	2	8	80
	3	9.8	10	2	8	78.4
Perlakuan alkali selama 4 jam	1	9.8	10	2	8	78.4
	2	10	10	2	8	80
	3	9.9	10	2	8	79.2
Perlakuan alkali selama 6 jam	1	10	10	2	8	80
	2	10	10	2	8	80
	3	9.9	10	2	8	79.2
Perlakuan alkali selama 8 jam	1	10	10	2	8	80
	2	10	10	2	8	80
	3	10	10	2	8	78.4

Tabel 6 Data hasil pengujian *impact* komposit serat rami tanpa perlakuan alkali

Jenis Komposit	No Spesimen	Friksi (J)	A° (mm ²)	Energi yang Diserap (J)	Harga Impak (J/mm ²)	Harga Impak Rata-Rata (J/mm ²)
Panjang Serat 50 mm	1	2.5	78.4	5	0.0875	0.0877
	2	2.5	80	5.5	0.0812	
	3	2.5	78.4	5	0.0946	

Tabel 7 Data hasil pengujian *impact* komposit serat rami

Jenis Komposit	No Spesimen	Friksi (J)	A° (mm ²)	Energi yang diserap (J)	Harga Impak (J/mm ²)	Harga Impak Rata-Rata (J/mm ²)
Perlakuan alkali selama 2 jam	1	2.5	78.4	5.7	0.0717	0.0683
	2	2.5	80	5.6	0.0704	
	3	2.5	78.4	6	0.0629	
Perlakuan alkali selama 4 jam	1	2.5	78.4	5	0.0755	0.0725
	2	2.5	80	5	0.0629	
	3	2.5	79.2	6.3	0.0792	
Perlakuan alkali selama 6 jam	1	2.5	80	5.5	0.0692	0.0671
	2	2.5	80	5.4	0.0692	
	3	2.5	79.2	5	0.0629	
Perlakuan alkali selama 8 jam	1	2.5	80	6	0.0629	0.0671
	2	2.5	80	5.7	0.0717	
	3	2.5	78.4	5.3	0.0667	



Gambar 6 Histogram hubungan kekuatan *impact* rata-rata komposit serat rami terhadap waktu perlakuan alkali

Untuk hasil pengujian *impact*, perbedaan antara harga *impact* rata-rata dari komposit disebabkan oleh beberapa hal. Antara lain disebabkan karena kekuatan komposit yang kurang merata dan distribusi serat yang kurang merata sehingga energi yang diserap menjadi lebih kecil. Sedangkan patahan yang terjadi adalah patahan getas.

Harga *impact* rata-rata yang tertinggi adalah komposit serat rami tanpa perlakuan alkali yaitu sebesar 0.0877 J/mm^2 sedangkan yang terendah adalah komposit serat rami dengan perlakuan alkali selama 6 dan 8 jam yaitu mempunyai harga *impact* rata-rata sebesar 0.0671 J/mm^2 dan 0.0671 J/mm^2 .

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisis pengujian serta pembahasan data yang diperoleh, dapat disimpulkan:

1. Kekuatan tarik rata-rata tertinggi adalah komposit dengan perlakuan alkali 8 jam yaitu sebesar 41.9 Mpa.
2. Modulus elastisitas rata-rata tertinggi adalah pada komposit dengan perlakuan alkali 2 jam yaitu sebesar 2743.15 Mpa.
3. Besarnya kekuatan *impact* rata-rata tertinggi adalah pada komposit dengan perlakuan alkali 4 jam yaitu sebesar 0.0725 J/mm^2 .

Saran

Dari hasil proses pencetakan ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, diantaranya:

1. Proses penekanan yang dilakukan terhadap komposit seharusnya menggunakan alat yang lebih baik sehingga dapat diperoleh penekanan yang lebih maksimal.
2. Meminimalkan keberadaan rongga udara (*void*) pada komposit yang akan dibuat sehingga akan menaikkan kemampuannya.
3. Dalam melakukan pembuatan benda uji hendaknya memakai alat pengaman, karena bahan benda uji merupakan bahan kimia.
4. Pada proses penuangan matrik kedalam serat harus merata agar serat benar-benar terbungkus oleh matrik, sehingga dapat meminimalkan terjadinya *void*.

5. Dalam melakukan pengujian hendaknya dilakukan sendiri agar kita mengetahui proses pengujian tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASTM. 1990. *Standart and Literature References for Composite Materials*, 2d ed., Philadelphia. PA: American Society for Testing and Materials.
- [2] Van Vlack. 1992. *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Edisi ke-5. Jakarta: Erlangga.
- [3] Surdia, T. dan S. Saito. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*, Cetakan ke-4. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [4] Dieter, George E.; Djaprie, Sriati. 1993. *Metalurgi Mekanik*, Edisi ke-3. Jakarta: Erlangga.
- [5] Groenendijk, J. Van der Line, Ir. Sobandi Sacrhri. 1996. *Pengujian Materil*. Jakarta: Binacipta.
- [6] _____. 1958. *ASM Hand Book Comitte Metallography and Microstructures*. American Society for Metal.

KAJI NUMERIK PENCEGAHAN PERTUMBUHAN RETAK DENGAN MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI BENTUK *STOP-DRILLED HOLE (SDH)*

Yudi Dwianda, Hendery Dahlan, Meifal Rusli

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang, Sumatera Barat

Email: henderydahlan@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Salah satu mekanisme kegagalan yang utama dalam aplikasi teknik atau komponen mesin adalah penjaralan retak kelelahan. Penjaralan retak ini biasanya dimulai dari titik-titik pada daerah yang mengalami konsentrasi tegangan yang tinggi. Oleh karena itu salah satu metode untuk menghambat penjaralan retak adalah mereduksi konsentrasi tegangan dimana salah satu metode yang digunakan adalah pemberian lubang di ujung retak atau dikenal dengan stop-drilled hole (SDH). Pada penelitian ini akan dikembangkan modifikasi bentuk model SDH. Pada dasarnya model yang dikembangkan ini adalah mengubah bentuk pada sisi lubang agar tidak berbentuk lengkungan sehingga konsentrasi tegangan menurun di daerah tersebut. Pemodelan lubang yang dikembangkan pada penelitian ini adalah penggabungan dua lubang dan tiga lubang pada ujung retak. Pada penelitian ini akan dilakukan penghitungan faktor konsentrasi tegangan untuk variasi jari-jari lubang yang diberikan. Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pemberian dua lubang dan tiga lubang pada ujung cetak tersebut dapat mereduksi faktor konsentrasi tegangan dengan signifikan, nilai faktor konsentrasi tegangan antara dua lubang dan tiga lubang tidak berbeda signifikan terutama dengan meningkatnya nilai jari-jari lubang. Sementara itu, faktor konsentrasi tegangan tetinggi terjadi pada daerah perubahan geometri pada lubang untuk pemberian dua atau tiga lubang, akan tetapi faktor konsentrasi tegangannya masih cukup rendah jika dibandingkan dengan pemberian satu lubang.

Kata Kunci: *Konsentrasi tegangan, penjaralan retak, stop-drilled hole (SDH)*

ABSTRACT

One of the major failure mechanisms in engineering applications or machine components is the propagation of fatigue cracking. The spreading of these cracks usually are started from the points on the regions that are experiencing high stress concentrations. Therefore, one of the method to inhibit this crack propagation is reducing the stress concentration in which one of the used methods is the provision of a hole at the end of a crack or known as a stop-drilled hole (SDH). In this research will be developed a modification form of SDH model. Basically the developed model is changing the shape on the hole side so there are not forming of the curve so that the stress concentration decreases in this area. The developed hole model in this research is the binding of two holes and three holes at the crack tip. This research will be calculated the stress concentration factor for variation of given hole radius. From the research that has been done, it can be concluded that the two holes and three holes on

the tip of the crack can reduce the stress concentration factor significantly. Moreover, the value of the stress concentration factor between two holes and three holes is not significantly different, especially with the increment of the hole radius. Meanwhile, the high stress concentration factor occurred in the geometrical change area of the hole for two or three holes, but the stress concentration factor is still quite low when compared to the one hole.

Keywords: *Stress Concentration, Crack Propagation, Stop-Drilled Hole (SDH)*

PENDAHULUAN

Salah satu mekanisme kegagalan yang utama dalam aplikasi teknik atau komponen mesin adalah penjaralan retak kelelahan. Penjaralan retak ini biasanya dimulai dari titik-titik pada daerah yang mengalami tegangan terkonsentrasi. Konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dari nilai kritis materialnya menyebabkan retak terus tumbuh sehingga menyebabkan kegagalan pada komponen mesin. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang efektif untuk menahan pertumbuhan retak sebelum kegagalan terjadi pada komponen mesin.

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menahan penjaralan retak kelelahan. Salah satu teknik yang paling populer adalah mengebor lubang di ujung retak untuk menghilangkan singularitas tegangan ujung retak. Metode ini disebut *stop-drilled hole* (SDH) [1]. Mekanisme metode ini mengakibatkan pertumbuhan retak tertunda atau berhenti sampai retakan baru dimulai. Berberapa modifikasi metode SDH telah dilakukan dengan membuat lubang tambahan disekitar daerah ujung retak [2,3], lubang tambahan dengan memasukan pin di dalamnya [4] dan membuat *double hole* di ujung retak [5].

Pada penelitian ini akan dikembangkan metode SDH yang konsepnya hampir sama dengan *double hole* [5] tetapi dengan memodifikasi bentuk SDH. Metode ini bertujuan untuk mereduksi konsentrasi tegangan pada sisi lubang, sehingga retak tidak tumbuh dan menjalar.

TEORI DAN PEMODELAN

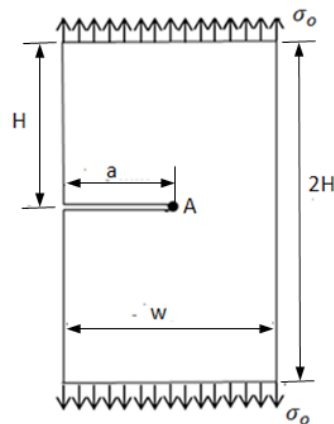
Jika sebuah spesimen pelat yang memiliki panjang w dan tinggi $2H$ mempunyai celah (*slit*) sepanjang a yang terletak sejauh H dari atas permukaan pelat mengalami pembebanan σ_0 , maka faktor konsentrasi tegangan (K_t) pada ujung celah (titik A) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad (1)$$

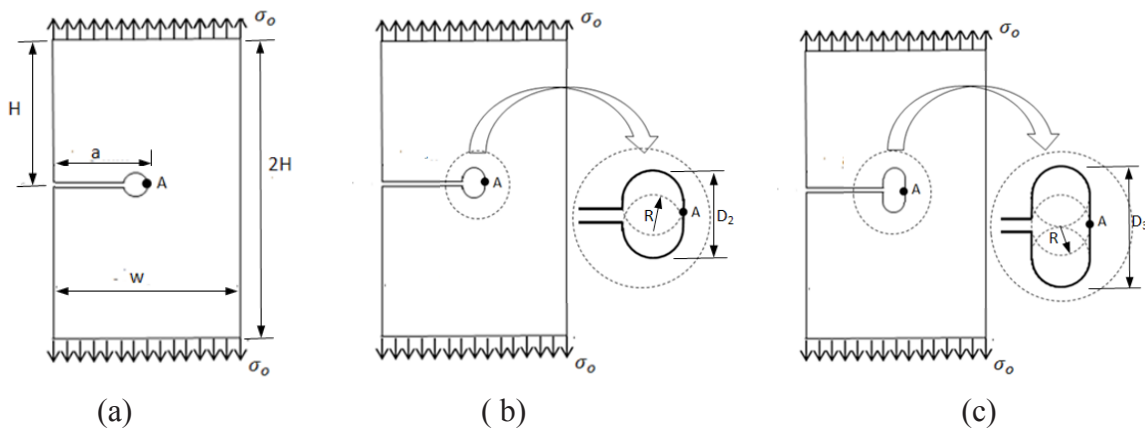
Dimana σ_{\max} adalah tegangan maksimum pada titik A dan σ_0 adalah tegangan yang diberikan pada spesimen pelat seperti diperlihatkan pada gambar 1.

Konsentrasi tegangan yang sangat tinggi akan menyebabkan munculnya retak dan jika pembebanan terus dilanjutkan maka retak akan menjalar dan selanjutnya akan terjadi kegagalan (patah). Untuk mereduksi konsentrasi tegangan tersebut maka dilakukan pemberian lubang di ujung retak dengan jari-jari R seperti terlihat pada gambar 2.a. Diketahui bahwa hubungan antara konsentrasi tegangan dengan jari-jari lubang adalah semakin besar jari-jari lubang yang diberikan maka konsentrasi tegangan yang diberikan akan menurun, akan tetapi dengan terbatas lebar pelat (w), jika pemberian jari-jari lubang yang terlalu besar, maka akan menyebabkan lebar pelat yang tidak memiliki celah kecil sehingga akan menyebabkan pelat mudah untuk mengalami kegagalan (patah). Oleh karena itu dikembangkan model lubang yang telah dimodifikasi. Pada dasarnya model yang dikembangkan ini adalah untuk mereduksi konsentrasi tegangan pada sisi lubang (titik A). Oleh karena itu bentuk pada sisi

lubang (titik A) dibuat tidak berbentuk lengkungan agar konsentrasi tegangan menurun di daerah tersebut. Pemodelan lubang yang dikembangkan adalah penggambaran dua lubang dan tiga lubang seperti terlihat pada gambar 2(b) dan 2(c).



Gambar 1. Spesimen pelat



Gambar 2. Spesimen pelat model SDH: (a) Satu lubang, (b) Dua lubang, (c) Tiga lubang

Pada gambar 2 (b) dan (c) terlihat bahwa pada titik A bentuk lubang menjadi garis lurus dimana panjang atau jarak antara dua puncak lengkungan menjadi $D_2 = 3R$ dan $D_3 = 4R$. Perubahan bentuk lubang tersebut akan menyebabkan konsentrasi tegangan pada daerah titik A akan jauh berkurang sehingga retak tidak akan muncul pada daerah tersebut.

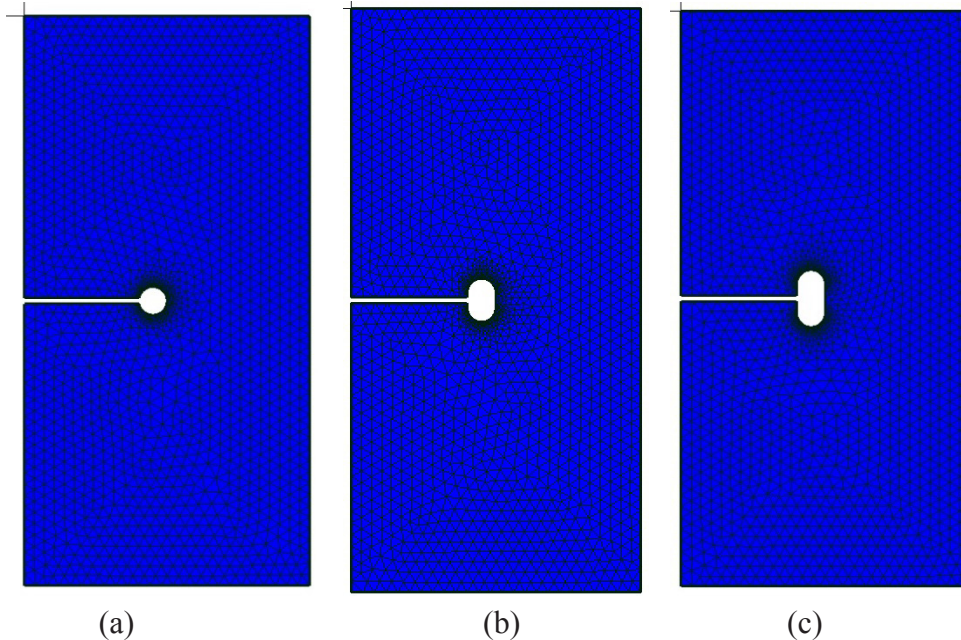
STUDI KASUS

Pada penelitian ini, sebuah model pelat yang digunakan mempunyai tinggi $(2H) = 100$ mm, lebar $(w) = 50$ mm, panjang celah $(a) = 25$ mm, tebal = 5 mm dan mengalami pembebanan (σ_0) sebesar 10 MPa. Sementara itu, besar celah yang dimodelkan adalah 0.01 mm dimana diujung celah (titik A) dibuat tumpul dengan bentuk setengah lingkaran. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan faktor konsentrasi tegangan (K_t) pada titik A untuk beberapa pemodelan pelat sebagai berikut:

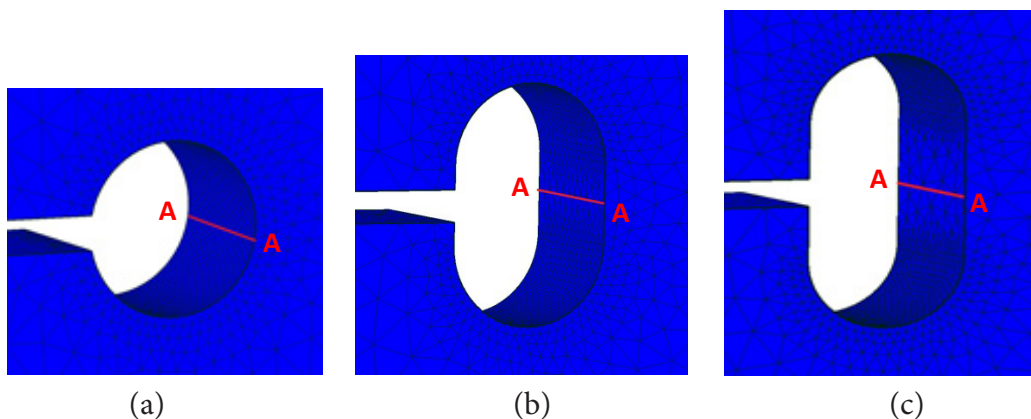
Pelat yang tidak mempunyai lubang (hanya celah saja) seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.

1. Pelat dengan satu lubang pada ujung retak seperti yang diperlihatkan pada gambar 2(a).
2. Pelat dengan dua lubang pada ujung retak seperti yang diperlihatkan pada gambar 2(b).
3. Pelat dengan tiga lubang pada ujung retak seperti yang diperlihatkan pada gambar 2(c).
4. Untuk pelat yang berlubang akan divariasikan besar jari-jari lubang (R), yaitu 1.25, 2.5,

3.75, 5.0, 6.25, dan 7.5 mm, sehingga variasi nilai D2 menjadi 3.75, 7.5, 11.25, 15.0, 18.75, dan 22.5 mm. Sementara itu variasi nilai D3 menjadi 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, dan 30.0 mm. Analisis yang dilakukan adalah kajian numerik dengan menggunakan paket program *Finite Element MecWay 7*. Pemodelan dengan program *Finite Element* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan pelat dengan *Finite Element*: (a) Satu lubang, (b) Dua lubang, dan (c) Tiga lubang



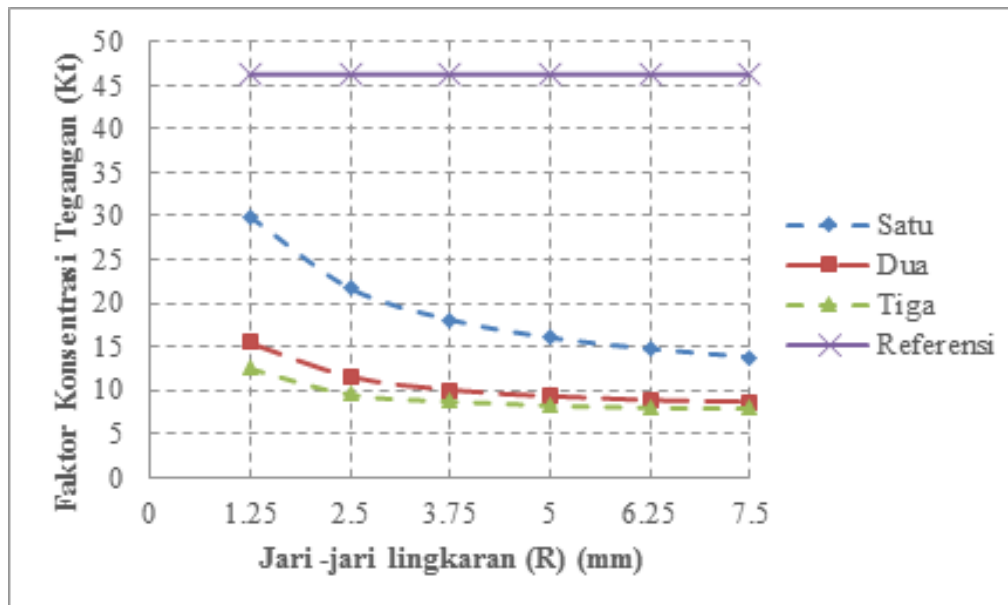
Gambar 4. Daerah yang diamalisis dengan *Finite Element*: (a) Satu lubang, (b) Dua lubang, dan (c) Tiga lubang

Pada gambar 4 terlihat daerah yang akan dianalisis pada penelitian ini adalah hasil penghitungan faktor konsentrasi tegangan (K_t) pada garis A untuk ketiga pemodelan.

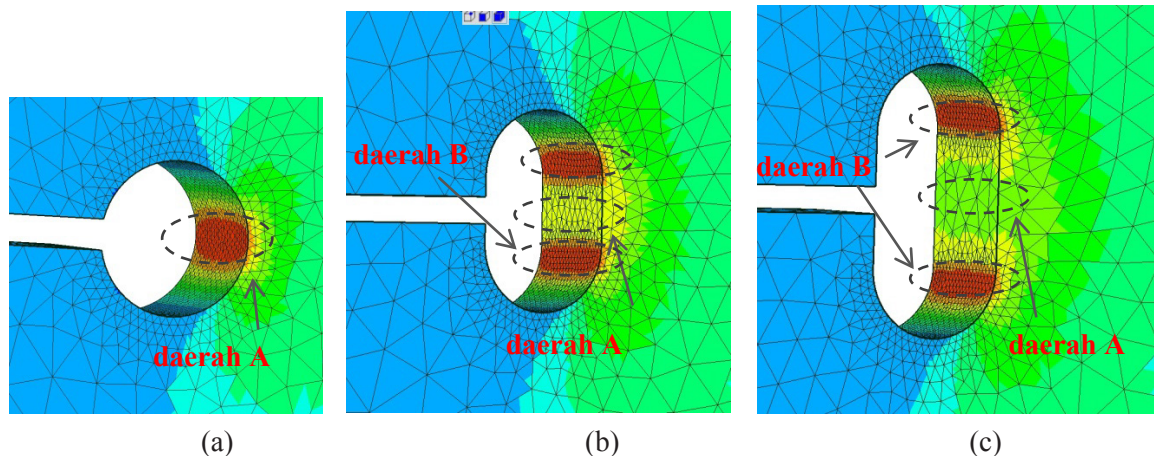
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, faktor konsentrasi tegangan pada ujung retak tanpa lubang akan menjadi nilai referensi. Pengaruh jumlah lubang dengan variasi nilai jari-jari terhadap faktor konsentrasi tegangan (K_t) pada daerah A diperlihatkan pada gambar 5. Pada gambar terlihat bahwa terjadi penurunan nilai konsentrasi tegangan dengan memberikan lubang pada ujung celah. Jumlah lubang juga memberikan pengaruh terhadap penurunan konsentrasi tegangan,

dimana semakin banyak lubang yang diberikan maka semakin turun faktor konsentrasi tegangan. Akan tetapi untuk jumlah lubang dua dan tiga nilai konsentrasi tegangan hampir sama dengan meningkatnya nilai jari jari lubang yang diberikan. Jika dibandingkan dengan nilai referensi, maka penurunan konsentrasi tegangan sangat signifikan terjadi dengan pemberian satu lubang. Penurunan nilai konsentrasi tegangan terus terjadi dengan signifikan dengan pemberian dua lubang pada ujung celah. Hal ini disebabkan oleh pindahnya konsentrasi tegangan dari daerah A seperti diperlihatkan pada gambar 6.

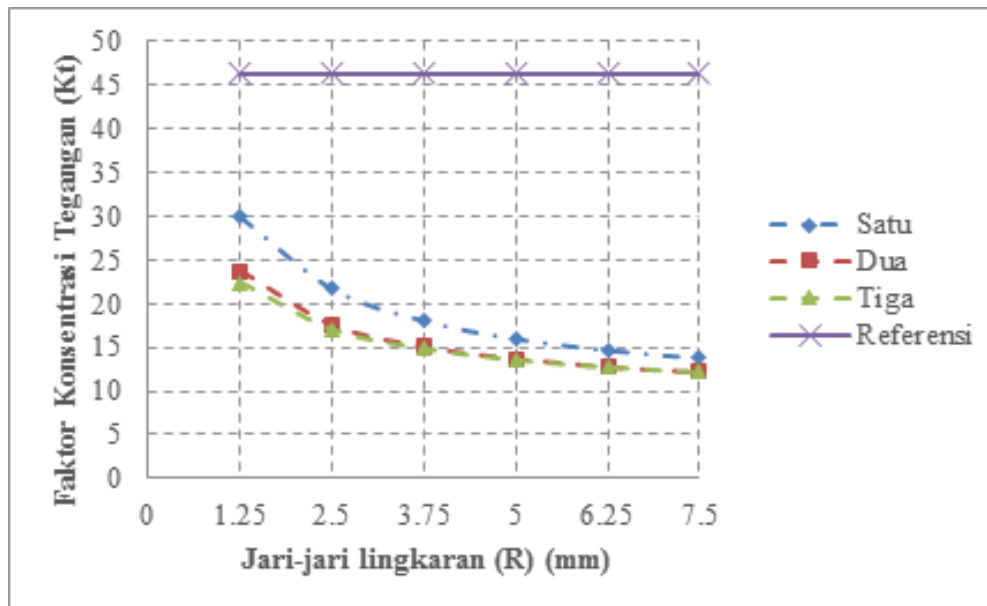


Gambar 5. Perbandingan faktor konsentrasi tegangan (K_t) terhadap variasi jari-jari untuk daerah A



Gambar 6. Daerah konsentrasai tegangan tertinggi (a) Satu lubang, (b) Dua lubang, dan (c) Tiga lubang

Pada gambar 6 (b) dan (c) terlihat bahwa daerah konsentrasi tertinggi terletak pada daerah pertemuan garis lurus dengan kelengkungan (daerah B). Hal ini disebabkan pada daerah tersebut terjadi perubahan bentuk geometri dari lubang sehingga menyebabkan konsentrasi tegangan tinggi di daerah tersebut. Jika konsentrasi tegangan yang tinggi di daerah tersebut dibandingkan dengan konsentrasi tegangan referensi dan satu lubang, maka faktor konsentrasi tegangan tersebut masih jauh lebih rendah seperti terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan faktor konsentrasi tegangan (K_t) terhadap variasi jari jari untuk daerah B

Pada gambar 7 terlihat bahwa faktor konsentrasi tegangan untuk lubang dua dan tiga memiliki nilai yang hampir sama, akan tetapi nilainya masih lebih rendah dari faktor konsentrasi referensi dan lubang satu. Pada gambar terlihat bahwa pemberian dua tiga lubang dapat mereduksi faktor konsentrasi tegangan meskipun tegangan yang dihitung adalah tegangan tertinggi. Selain itu dengan memperbesar jari-jari lingkaran, faktor konsentrasi tegangan cenderung turun meskipun mulai dari nilai jari-jali lingkaran 5 mm, nilai faktor konsentrasi tegangan cenderung konstan.

KESIMPULAN

Pada penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode memodifikasi bentuk SDH dapat mereduksi faktor konsentrasi tegangan sehingga penjalaran retak dapat dihambat.
2. Pemberian dua lubang dan tiga lubang pada ujung cetak dapat mereduksi faktor konsentrasi tegangan dengan signifikan.
3. Nilai faktor konsentrasi tegangan antara dua lubang dan tiga lubang tidak berbeda signifikan terutama dengan meningkatnya nilai jari-jari lubang.
4. Konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada daerah perubahan geometri pada lubang untuk pemberian dua atau tiga lubang, akan tetapi faktor konsentrasi tegangannya masih cukup rendah jika dibandingkan dengan pemberian satu lubang pada ujung celah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih pada Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas atas bantuan biaya pada Skim Penelitian Jurusan Teknik Mesin 2017.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Song PS, Shieh YL. 2004. *Stop Drilling Procedure for Fatigue Life Improvement*. International Journal of Fatigue, 26, pp. 1333–1339.
- [2] Murdani A., Macabe C., Saimoto A., Kondo R. 2008. *A Crack Growth Arresting Technique in Aluminum Alloy*. Engineering Failure Analysis, 15, pp. 302-310.

- [3] T. Nateche T., Hadj Meliani M., Matvienko Y.G., Pluinage G., 2016, *Drilling Repair Index (DRI) Based on Two-Parameter Fracture Mechanics for Crack Arrest Holes*, Engineering Failure Analysis, 59, pp. 99–110.
- [4] Macabe C., Murdani A., Kuniyoshi K., Irei Y., Saimoto A., 2009. *Crack – Growth Arrest by Redirecting Crack Growth by Drilling Stop Holes and Inserting Pins into Them*. Engineering Failure Analysis, 16, pp. 247-483.
- [5] S.M.J. Razavi S. M. J., Ayatollahi M. R., Sommitsch C., Moser C., 2017, *Retardation of Fatigue Crack Growth in High Strength Steel S690 Using A Modified Stop-Hole Technique*, Engineering Fracture Mechanics, 169, pp. 226-237.

PENGARUH KOMPOSISI PEREKAT TEPUNG PADA BIOBRIKET LIMBAH BAGLOG JAMUR

**Widodo Hadi Prabowo, Muhammad Viki Lutfiana,
Rosid, Muhammad Burhanuddin Ubaidillah**

Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartosura

Email: d400140012@student.ums.ac.id

ABSTRAK

Energi yang berasal dari biomassa, misalnya limbah baglog yang selama ini dibuang atau tidak dimanfaatkan, merupakan limbah yang dapat dikonversi menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Limbah baglog jamur dimanfaatkan sebagai bahan bakar dengan cara mengubah limbah tersebut menjadi biobriket. Tujuan penelitian dilakukan untuk pengkajian laju pembakaran, nilai kalor, kadar abu, kadar air, kadar zat yang menguap, kadar karbon, dan drop test pada biobriket. Metode yang digunakan dalam pembuatan menggunakan perbandingan A (1:1:1) dengan komposisi tepung kanji 250 gram, limbah baglog 250 gram, dan air 250 ml. Perbandingan B (1:2:2) dengan komposisi tepung kanji 250 gram, limbah baglog 500 gram, dan air 500 ml. Perbandingan C (1:3:3) dengan komposisi tepung kanji 250 gram, limbah baglog 1000 gram, dan air 1000 ml. Pembuatan yang pertama dengan penghancuran limbah baglog dan pengeringan, pencampuran tepung, limbah baglog, dan air, pengepresan biobriket kemudian dikeringkan. Hasil penelitian memperoleh nilai kalor, kadar air, kadar karbon, dan kadar zat yang menguap terdapat pada biobriket sampel A (1:1:1) sebesar 4065,69 kal/g, 5%, 15,4%, dan 71,4 % untuk kadar abu terbaik terdapat pada sampel B (1:2:2) sebesar 4,8%.

Kata kunci: *Limbah baglog, biobriket, bahan bakar fosil, jamur tiram*

ABSTRACT

Energy derived from biomass such as baglog waste that has been disposed or not utilized, is a waste that can be converted into alternative energy sources of fossil fuel. Wastes baglog mushrooms are used as fuel by the way, turning the waste into bio briquette. The aim of this research is to test the combustion rate, calorific value, ash content, moisture content, volatile substance content, carbon content and drop test on bio briquett. The method used in the preparation uses A (1:1:1) comparison with starchy flour composition 250 grams of baglog 250 grams and 250 ml water, B ratio (1:2:2) with starchy flour composition 250 grams baglog 500 grams and water 500 ml, C ratio (1:3:3) with starch flour composition 250 grams of baglog waste 1000 grams and water 1000 ml. Making the first with the destruction of baglog waste and drying, mixing flour, baglog waste and water, briquette pressing then dried. The results of the research were obtained values of calorific, water content, carbon content and the content of volatile substances in A (1:1:1) biobriket of 4065.69 cal/g, 5%, 15.4%, and 71.4% The best ash content was found in sample B (1:2:2) of 4.8%. The results obtained of calorific value, moisture content, carbon content and volatile substances

were found in A (1:1:1) sample biobriket of 4065, 69 cal / g, 5%, 15.4%, and 71.4% for the best ash content were found in sample B (1: 2: 2) of 4.8%.

Keywords: *Baglog waste, bio briquette, fossil fuel, oyster mushroom*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi manusia dari waktu ke waktu semakin meningkat seiring dengan bertambahnya penduduk dan teknologi. Sehingga menyebabkan kelangkaan energi dan meningkatnya harga minyak bumi di dunia. Demikian pula pemerintah Indonesia mengambil langkah untuk menetapkan kenaikan harga bahan bakar minyak (BBM) dan gas LPG, agar beban masyarakat lebih ringan, maka pemerintah mengimbau agar dapat memanfaatkan bioenergi yang ada.

Bioenergi adalah energi yang berasal dari biomassa. Sedangkan pengertian dari biomassa adalah jumlah bahan hidup yang terdapat di dalam satu atau beberapa jenis organisme yang berada di dalam habitat tertentu. Biomasa pada umumnya dinyatakan dalam berat kering organisme persatuan luas habitat. Biomasa adalah salah satu sumber daya hayati, merupakan energi matahari yang telah ditransformasi menjadi energi kimia oleh tumbuhan berhijau daun.

Kegiatan di bidang pertanian banyak menghasilkan limbah yaitu limbah padat, cair, dan gas. Selama ini limbah yang dihasilkan oleh petani belum dimanfaatkan secara optimal, padahal limbah tersebut dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif ataupun produk sampingan yang bernilai ekonomis, sehingga petani memperoleh nilai tambah dari hasil limbah pertanian. Salah satunya pembuatan biobriket dari limbah baglog jamur tiram. Biobriket dari limbah baglog jamur tiram yang dihasilkan dapat menjadi produk yang mempunyai nilai ekonomis.

Biobriket dari limbah baglog jamur tiram mampu mengubah limbah pertanian menjadi bahan bakar dengan efisiensi konversi cukup baik. Limbah baglog dari jamur tiram yang sudah tidak produktif jika tidak dimanfaatkan akan menjadi sampah yang menumpuk dan mengotori lingkungan, limbah baglog tersebut dapat dimanfaatkan antara lain dibuat sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil yaitu biobriket. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui cara pembuatan biobriket dari limbah baglog jamur tiram dan mengetahui karakteristik biobriket tersebut.

METODE

Kegiatan penelitian dilaksanakan pada bulan Maret–Juni 2017. Tempat pelaksanaan di Laboratorium Kantor BPSMB Surakarta. Alat yang digunakan dalam penelitian alat pengepresan biobriket; tong drum; kual; kompor; pengaduk kayu; pralon diameter 4 cm, tinggi 5 cm, lubang tengah 0,5 cm; timbangan analog; *bomb* kalorimeter; oven; cawan; dan tanur. Bahan yang digunakan untuk pembuatan biobriket adalah limbah baglog jamur tiram, korek api, tepung kanji, air, minyak tanah, dan plastik.

Prosedur Penelitian

Proses Pembuatan Biobriket

Pengupasan plastik pada limbah baglog yang terbungkus plastik. Limbah baglog tersebut yang menggumpal dihancurkan agar menjadi rata seperti serpihan serbuk, kemudian disaring dengan ukuran 60 mesh, setelah itu tahap pengeringan. Pengeringan ini bertujuan untuk menghilangkan lendir dan kadar air. Pengeringan tersebut membutuhkan waktu 3-4 hari. Baglog yang sudah kering warnanya akan tampak muda, kemudian membuat biobriket dengan perbandingan antara lain:

1. Biobriket A dengan perbandingan 1:1:1 dengan komposisi tepung kanji 250 gram, limbah baglog 250 gram, air hangat 250 ml.
2. Biobriket B dengan perbandingan 1:2:2 dengan komposisi tepung kanji 250 gram, limbah baglog 50 gram dan air hangat 500 ml.
3. Biobriket C dengan perbandingan 1:3:3 yaitu dengan komposisi tepung kanji 250 gram, limbah baglog 1000 gram, air hangat 1000 ml.
4. Pengepresan dan pencetakan biobriket dengan tekanan 50 kg/cm² hingga padat, kemudian dikeringkan selama 4-6 hari, setelah padat dan kering biobriket siap digunakan.

Uji Karakteristik Biobriket

Bahan bakar padat memiliki karakteristik dasar sebagai berikut:

a. Nilai Kalor

Nilai kalor bahan bakar adalah jumlah satuan panas yang dihasilkan persatuan bobot dari proses pembakaran cukup oksigen dari suatu bahan yang mudah terbakar. Nilai kalor yang diperoleh melalui *oksigen bomb calorimeter* dengan medel PAAR 1755 EF dengan persamaan sebagai berikut:

$$HHV = \frac{(\Delta T \times EEV) - (e_1 - e_2)}{m} - e_s \quad (1)$$

Dimana:

- HHV = *Highest Heating Value* (kal/gram)
 ΔT = kenaikan suhu pembakaran di dalam bom kalori meter (oC)
 EEV = energi ekivalen saat terjadi pembakaran (kal/ oC)
 e_1 = koreksi panas karena pembentukan asam (kal)
 e_2 = koreksi panas pembakaran dari kawat pembakar (kal)
 e_s = koreksi sulphur yang ada dalam bahan bakar (kal/g)
 m = berat contoh (g)

b. Kadar Air

Prosedur pengukuran kadar air dengan menggunakan oven dan timbangan analog. Contoh sampel uji ditimbang sebanyak ± 2 gram, kemudian dimasukkan dalam oven 105-110°C selama waktu 1 jam. Setelah dipanaskan dari oven kemudian ditimbang lagi. Perhitungan kadar presentase kadar air yang terkandung dalam biobriket tersebut dengan menggunakan standart ASTM D-3173-03 dengan persamaan sebagai berikut

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

- G_0 = berat contoh sampel sebelum dikeringkan (gr)
 G_1 = berat contoh sampel sesudah dikeringkan dengan temperatur 105-110°C (gr)

c. Kadar Abu

Kadar abu pengujian dengan menggunakan cawan, tanur, dan timbangan analog, untuk mendapatkan nilai kadar abu maka diperlukan perhitungan dengan standar ASTM D-3173-03 sebagai berikut:

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{C}{A} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

C = berat abu (gr)

A = berat bahan sebelum pengabuan (gr)

d. Kadar zat yang menguap (Volatile Matter)

Penentuan zat mudah menguap adalah contoh uji ± 5 gr setelah diukur berat awal, dimasukkan ke dalam cawan porselin dan ditanurkan dengan suhu 900°C . Contoh uji didinginkan di dalam tanur, setelah dingin tidak ada cuplikan putih (abu), contoh uji dimasukkan ke dalam desikator, setelah 1 jam ditimbang sebagai berat (dikurangi berat cawan). Prosedur perhitungan kadar zat yang menguap menggunakan standar ASTM D-3173-03 dengan rumus

$$\text{Volatile Matter, \%} = \frac{E - D}{E} \times 100\% \quad (4)$$

Dimana:

E = berat contoh sampel sebelum dikeringkan (gr)

D = berat contoh sampel sesudah dikeringkan dengan temperatur 900°C (gr)

e. Kadar Karbon Terikat (*Fixed Carbon*)

Kandungan karbon terikat (*fixed carbon*), yaitu komponen yang bila terbakar tidak membentuk gas yaitu karbon tetap yang terdapat pada bahan bakar padat berupa biobriket. Analisis kadar karbon terikat dapat menggunakan persamaan

$$\text{FC} = 100 \% - (\text{VM} + \text{Kadar air} + \text{Kadar abu}) \% \quad (5)$$

Dimana:

FC = *Fixed Carbon*

VM = *Volatile Matter*

f. *Drop Test*

Drop test dilakukan untuk menguji ketahanan biobriket dengan benturan pada permukaan keras dan datar ketika dijatuhkan dari ketinggian 2 meter. Prosedur perhitungan *drop test* biobriket dengan menggunakan standar ASTM D 440-86 R02 dengan rumus

$$\text{Drop test \%} = (A - B) / A \times 100\% \quad (6)$$

Dimana:

A = Berat biobriket sebelum dijatuhkan (gram)

B = Berat biobriket setelah dijatuhkan (gram)

g. Laju pembakaran

Untuk mendapatkan laju pembakaran sesaat (m) dapat menggunakan rumus,

$$m = \Delta m / \Delta t \quad (7)$$

Dimana:

Δm = laju pengurangan massa (g)

Δt = waktu (s)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji karakteristik bahan perekat tepung kanji, air mendidih dan tepung kanji dengan perbandingan A (1:1:1), perbandingan B (1:2:2), perbandingan C (1:3:3). Ukuran biobriket tersebut diameter 4 cm, tinggi 5 cm lubang tengah 0,5 cm pada gambar 1.



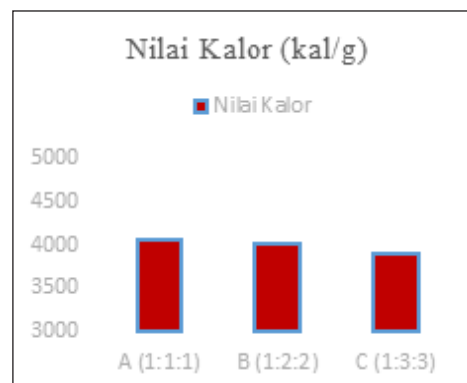
Gambar 1. Biobriket dari limbah baglog jamur

Pengaruh Perekat terhadap Nilai Kalor

Tabel 1. Hasil pengujian nilai kalor

Sampel	Nilai Kalor (kal/g)	SNI pada Arang Kayu
A (1:1:1)	4065,69	Min 5000
B (1:2:2)	4004,32	
C (1:3:3)	3904,10	

Nilai kalor dapat diketahui dengan menggunakan bomb calorimeter, dan memperoleh hasil seperti pada Tabel 1.



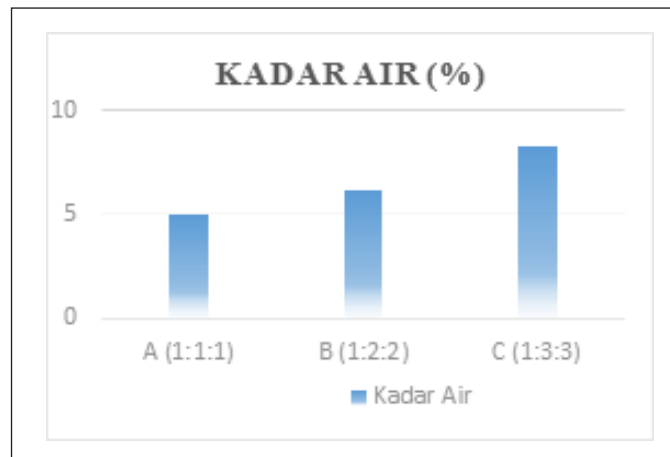
Gambar 2. Grafik perbandingan komposisi pada biobriket terhadap nilai kalor

Pengaruh Perekat terhadap Kadar Air

Tabel 2. Hasil pengujian kadar air

Sampel	Kadar Air (%)	SNI pada Arang Kayu
A (1:1:1)	5	
B (1:2:2)	6,2	Max 8
C (1:3:3)	8,3	

Hasil pengujian kadar air diperoleh kadar air terendah yaitu 5% pada sampel A (1:1:1), kadar air tertinggi pada sampel C (1:3:3) yaitu 8,3%. Pada Grafik 2 dapat dilihat pengaruh variasi komposisi terhadap kadar air yang dihasilkan. Kenaikan komposisi ranting pada briket akan berpengaruh terhadap besar kadar airnya. Sehingga dari data tersebut komposisi terbaik menurut kadar airnya adalah variasi biobriket A (1:1:1) dengan kadar air 5%.



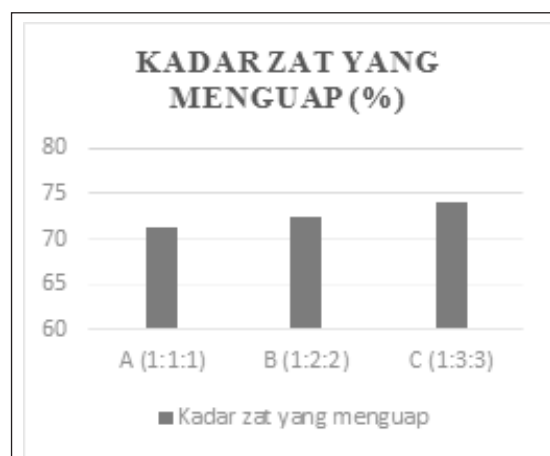
Gambar 3. Grafik perbandingan komposisi pada biobriket terhadap kadar air

Pengaruh Perekat terhadap Kadar Zat yang Menguap

Tabel 3. Hasil pengujian kadar zat yang menguap

Sampel	Kadar Zat yang Menguap (%)	SNI pada Arang Kayu
A (1:1:1)	71,4	Max 15
B (1:2:2)	72,5	
C (1:3:3)	74	

Tabel 3 menunjukkan semua komposisi sampel biobriket tidak termasuk SNI, karena kadar zat yang menguap tinggi maka asap yang keluar pada saat pembakaran akan tinggi.



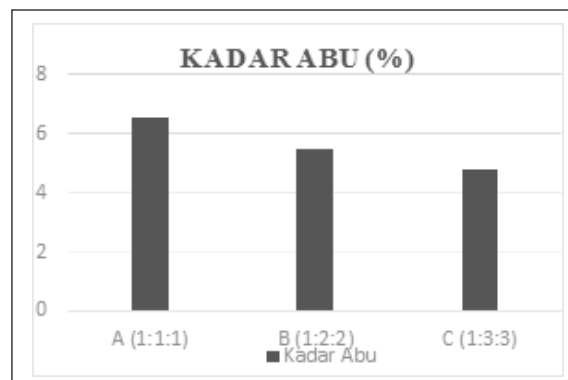
Gambar 4. Grafik perbandingan komposisi pada biobriket terhadap kadar zat yang menguap

Pengaruh Perekat terhadap Kadar Abu

Tabel 4. Hasil pengujian kadar abu

Sampel	Kadar Abu (%)	SNI pada Arang Kayu
A (1:1:1)	6,55	Max 8
B (1:2:2)	5,5	
C (1:3:3)	4,8	

Kandungan abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor biobriket limbah baglog, sehingga kualitas biobriket tersebut menurun. Kadar abu tertinggi terdapat pada sampel A (1:1:1) yaitu 6,55 dan kadar abu terendah terdapat pada sampel C (1:2:2) yaitu sebesar 4,8. Kadar abu pada semua sampel sudah termasuk SNI.



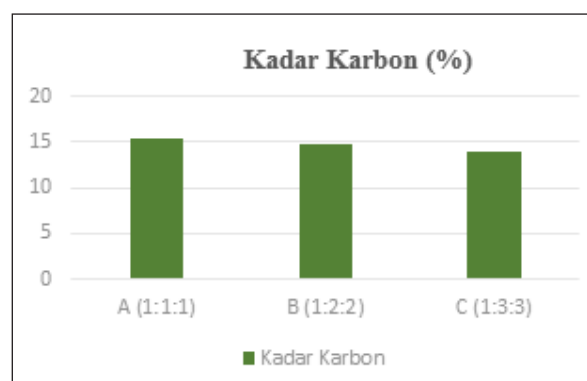
Gambar 5. Grafik perbandingan komposisi pada biobriket terhadap kadar abu

Pengaruh Perekat terhadap Kadar Karbon

Keberadaan kadar karbon di dalam biobriket limbah baglog dipengaruhi oleh nilai kadar abu dan kadar zat yang menguap. Kadarnya akan bernilai tinggi apabila kadar abu dan kadar zat yang menguap rendah. Tabel 5 menunjukkan bahwa semua sampel tidak termasuk SNI

Tabel 5. Hasil pengujian kadar karbon

Sampel	Kadar Karbon (%)	SNI pada Arang Kayu
A (1:1:1)	15,4	Min 77
B (1:2:2)	14,7	
C (1:3:3)	13,9	



Gambar 5 Grafik perbandingan komposisi pada biobriket terhadap kadar karbon

KESIMPULAN

Biobriket limbah baglog dengan karakteristik terbaik dengan sampel A (1:1:1) yaitu dengan komposisi tepung kanji sebesar 250 gram, limbah baglog 250 gram, dan air hangat 250 ml dimana nilai kalor tersebut sebesar 4065,69 kal/g. Kualitas biobriket akan meningkat seiring bertambahnya bahan perekat karena bahan perekat memiliki sifat dapat meningkatkan nilai kalor karena mengandung unsur C dan tidak melalui proses karbonisasi sehingga nilai kalor tersebut tidak memenuhi standar, kadar air sebesar 5%, kadar karbon 15,4%, dan kadar zat yang menguap sebesar 71,4 % . Kadar abu terbaik terdapat pada sampel C (1:3:3) sebesar 4,8%, karena kadar abu yang rendah akan menaikkan nilai kalor pada biobriket. Lima analisis yang telah dilakukan terdapat beberapa yang tidak memenuhi standar SNI, jadi dapat disimpulkan bahwa limbah baglog kurang layak dijadikan bahan bakar biobriket. Perlu ada penelitian lebih lanjut agar biobriket tersebut mencapai SNI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada petani jamur Adik Viki di Desa Kutowinangun, Kecamatan Tingkir, Kota Salatiga yang telah memberikan limbah baglog dan kantor BPSMB Surakarta yang telah membantu dalam pengujian biobriket.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (DESDM). 2004. *Statistik Energi Indonesia*.
- [2] Earl, D.E., 1974. *A report on Corcoal*, Andre Meyer Researc Fellow. FAO. Rome.
- [3] Haygreen, J.G *et al.* 1989. *Hasil Hutan dan Ilmu Kayu Suatu Pengantar*, Diterjemahkan oleh Sutjipto A. Hadikusumo. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- [4] Hendra, D. 1999. *Bahan Baku Pembuatan Arang dan Briket Arang*. Bogor: Litbang Hutan Gunung Batu.
- [5] Sulistyanto. 2006. *Karakteristik Pembakaran Biobriket Campuran Batubara dan Sabut Kelapa*. Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta. Hal. 45-52
- [6] Sani, Hardy Rakhman. 2009. *Pembuatan Briket Arang dari Campuran Kulit Kacang Cabang dan Ranting Pohon Sengon serta Sebetan Bambu*. Bogor: Departemen Hasil Hutan Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor.
- [7] Masnun. *Teknologi Pembuatan Biobriket dari Limbah Baglog*. <http://bppjambi.info/newspopup.asp?id=739>. Diakses pada tanggal 15 Oktober 2016
- [8] Satmoko. 2013. *Pengaruh Variasi Temperatur Cetakan terhadap Karakteristik Briket Kayu Sanggon pada Tekanan Kompaksi 6000 Psig*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- [9] Pane, E. 2015. *Pengaruh Konsentrasi Perekat Tepung Tapioka dan Penambahan Kapur dalam Pembuatan Briket Arang Berbahan Baku Pelepah Aren (Arenga pinnata)*. Jurnal Teknik Kimia USU. 4 (2): 32-38.

PERBANDINGAN KUALITAS MATERIAL BEARING MERK SKF, FMB, NKK, DAN JAL TERHADAP TERHADAP SIFAT FISIS DAN MEKANIS

Masryukan, Ngafwan, dan Taufik Surya Nugroho

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan, Kartosura

Email: masyrukan@ums.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kualitas bahan yang digunakan pada empat merk bearing (SKF, FMB, NKK, dan JAL) berdasarkan data-data pengujian sifat-sifat mekanik serta struktur intern (struktur mikro) pada benda uji tersebut dan dapat membandingkan ketahanan dan kekuatan keempat merk bearing tersebut berdasarkan analisis pengujian terhadap kegunaannya. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian kekerasan menggunakan alat Micro Vickers Hardness Tester, pengamatan struktur mikro menggunakan alat Olympus Metallurgical Microscope dan Olympus Phtomicrographics Systems, serta pengujian kekasaran permukaan menggunakan alat Surfcoorder. Pengujian kekerasan maupun struktur mikro dilakukan pada bagian cincin luar bantalan (outer bearing) dan ball bearing. Sedangkan pengujian kekasaran permukaan hanya pada bagian outer bearing. Setelah dilakukan semua pengujian dapat disimpulkan bahwa berdasarkan kekuatan, kekerasan (ketahanan aus) serta kekasaran permukaan pada bagian outer bearing dan ball bearing maka merk yang memenuhi kualitas optimum adalah merk FMB karena sudah mencukupi dengan parameter kerja bantalan sehingga membuat umur pakai lebih panjang pada aspek penggunaan yang sama.

Kata kunci: *bearing, kekerasan, struktur mikro, kekasaran permukaan*

ABSTRACT

This study aims to determine the quality of materials used in four bearing brands (SKF, FMB, NKK, and JAL) based on data testing of mechanical properties as well as internal structure (micro structure) on the specimens and can compare the endurance and the strength of the four brands bearings based on the test analysis of its usefulness. The tests include hardness testing using the Micro Vickers Hardness Tester tool, microstructure observation using Olympus Metallurgical Microscope and Olympus Phtomicrographics Systems, and surface roughness testing using Surfcoorder tool. Hardness testing and microstructure are performed on outer bearing and ball bearing parts. While the surface roughness testing only on the outer bearing. After all tests, it can be concluded that based on strength, hardness (wear resistance) and surface roughness on outer bearing and ball bearings, the brand that meets the optimum quality is the FMB brand because it is sufficient with the bearing working parameters that make longer life on the same aspect of use.

Keywords: *bearing, strengtness, microstructure, surface roughness*

PENDAHULUAN

Di dalam konstruksi mesin, *bearing* merupakan bagian yang sangat penting. *Bearing* adalah sebagai elemen mesin yang mampu menumpu poros berbeda, sehingga putaran atau gerakan bolak-baliknya dapat berlangsung secara halus dan aman. Jika *bearing* tidak berfungsi dengan baik maka prestasi seluruh sistem akan menurun atau tidak dapat bekerja dengan semestinya.

Bearing merupakan komponen yang paling sering bergesekan pada saat mesin hidup akibat adanya putaran poros dan panas, maka harus memiliki persyaratan sebagai berikut [1]

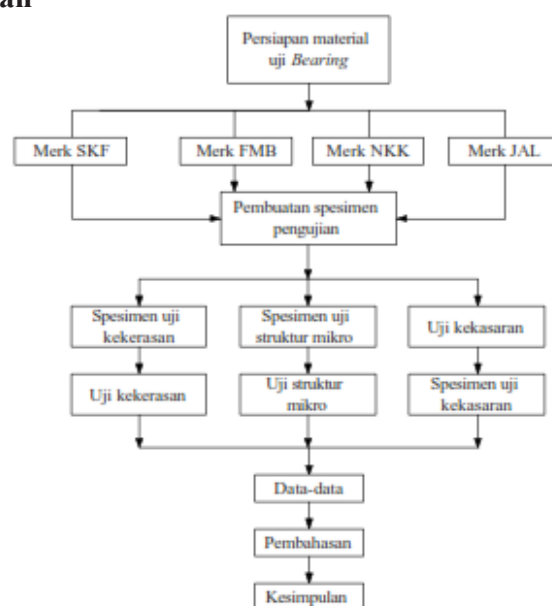
1. Tahan terhadap keausan dan gesekan.
2. Tahan terhadap korosi/karat.
3. Tahan terhadap kejutan.
4. Tahan terhadap panas.
5. Kuat dan tidak mudah patah.

Dalam pemilihan produk yang menurut kebutuhan dan kualitas yang relatif handal. Kehandalan suatu produk salah satunya ditentukan oleh sifat mekanik dari bahan yang digunakan. Sifat yang penting untuk diperhatikan dari suatu bahan adalah kekuatan, kekerasan, kekakuan, ketangguhan, dan sifat lain yang dibutuhkan [2,3]. Selain itu perlu dipertimbangkan bentuk produk dan cara memproduksinya [1], dan memperhatikan sifat material ideal seperti bahan baku dan cadangannya yang mudah didapat, harga yang murah, dapat didaur ulang, hemat energi, tahan korosi, banyak penggunaannya, dan sebagainya.

Untuk mengetahui sifat-sifat suatu bahan adalah dengan melakukan suatu pengujian terhadap bahan tersebut. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui berbagai sifat seperti struktur, sifat teknologi (dapat ditempa, dapat diubah bentuk, dapat dilas, dan sebagainya), sifat mekanis (kekuatan tarik, kekerasan, keliatan, dan sebagainya), sifat termal, sifat dalam medan listrik, komposisi kimia, dan lain-lain. Karena pemikiran-pemikiran tersebut, penulis melakukan penelitian dalam bidang metalurgi dengan melakukan perbandingan kualitas antara empat merk *bearing* yang berbeda yaitu SKF, FMB, NKK, dan JAL dengan melakukan pengujian kekerasan, pengamatan struktur mikro, pengujian kekasaran, dan pengujian komposisi kimia.

METODOLOGI PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Material Alat Uji

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *bearing* yang dibeli pada *dealer* resmi dengan merk SKF, FMB, NKK, dan JAL.



Gambar 2. Empat jenis *bearing* yang diteliti.

Pembuatan Spesimen Uji

1. Pemotongan

Pemotongan dilakukan dengan metode *meta cut* dengan pendinginan menggunakan air.

Tabel 1. Rincian benda uji yang digunakan dalam pengujian

No.	Jenis pengujian	Jumlah benda uji	Bagian Yang diuji
1.	Kekerasan dan Struktur mikro	8 buah	<i>Outer dan ball bearing</i>
2.	Kekasaran	4 buah	<i>Outer bearing</i>
Jumlah total spesimen		12 buah	

2. Pengikiran (*grinding*)

3. Pengamplasan dan peresinan

Pengamplasan dilakukan secara manual dengan menggunakan kertas amplas dan pendinginan menggunakan air. Peresinan dilakukan setelah pengamplasan dengan tujuan untuk memudahkan pemegangan spesimen karena spesimen yang terlalu kecil.

4. Pemolesan (*polishing*)

Dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan alur pemakanan akibat proses pengamplasan dengan media *autosol*.

5. Pengetsaan

Dilakukan khusus untuk spesimen yang akan diuji struktur mikro.

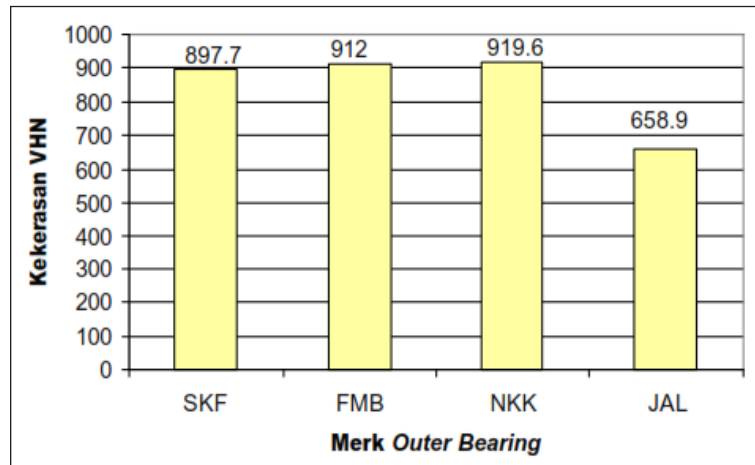
6. Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan yang digunakan adalah dengan menggunakan metode *micro vickers*.

7. Pengujian kekasaran

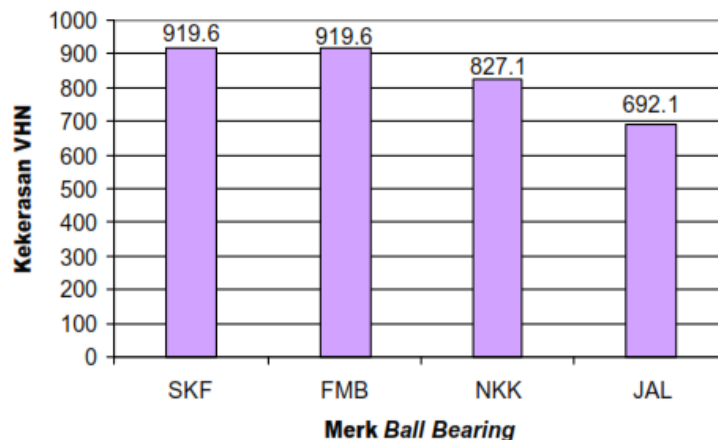
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kekerasan



Gambar 3. Histogram harga kekerasan rata-rata pada *outer bearing*

Pada pengujian bagian *outer bearing* didapatkan harga kekerasan rata-rata tertinggi pada merk NKK sebesar 919,6 VHN disusul merk FMB sebesar 912 VHN, merk SKF sebesar 897,7 VHN dan terendah adalah merk JAL sebesar 658,9 VHN seperti ditunjukkan pada gambar 3. Dengan harga kekerasan tertinggi pada bearing merk NKK maka bagian *outer* tersebut akan lebih tahan lama terhadap keausan pada permukaan pasan akibat gesekan pada watu pemasangan atau perputaran poros.

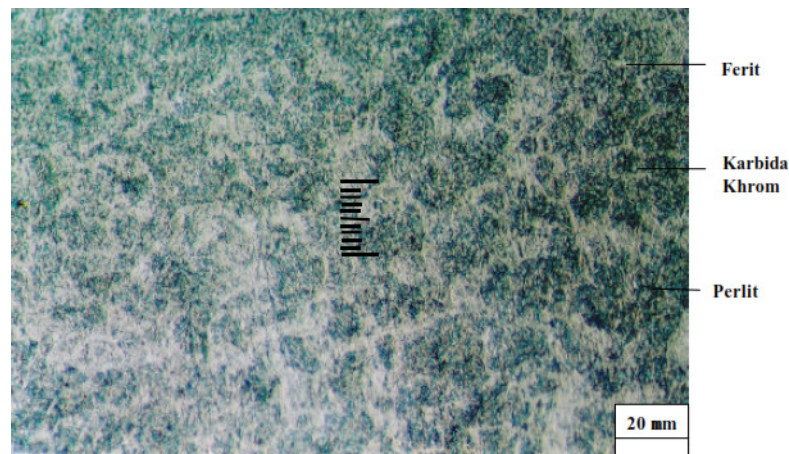


Gambar 4. Histogram harga kekerasan rata-rata pada *ball bearing*

Dari pengujian kekerasan pada bagian *ball* maka didapatkan bahwa merk SKF dan merk FMB masing-masing mempunyai harga kekerasan rata-rata yang sama yaitu sebesar 919,6 VHN yang merupakan harga kekerasan tertinggi, disusul dengan merk NKK sebesar 827,1 VHN, dan paling rendah adalah merk JAL sebesar 692,1 VHN seperti ditunjukkan pada gambar 4.

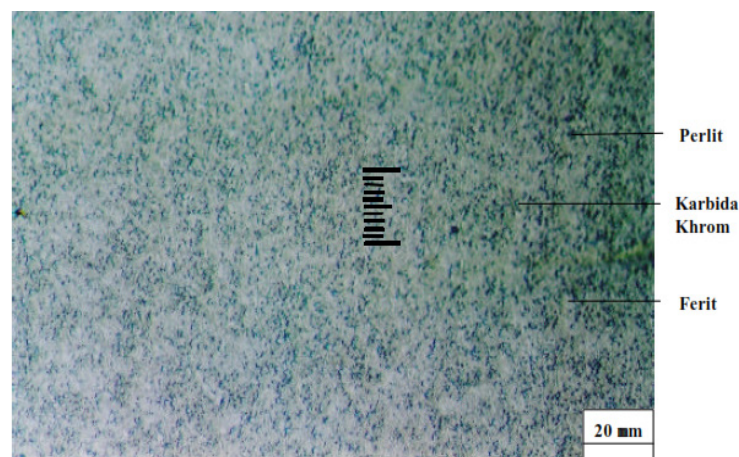
Secara umum dapat dikatakan bahwa kekerasan pada bagian bola (*ball bearing*) dengan cincin luar (*outer bearing*) lebih tinggi pada bagian bola (*ball*) karena secara aplikatif penerapan lapangan pada bagian bola dengan luas bidang kontak sangat kecil maka beban per satuan luas atau tekanannya menjadi sangat tinggi. Dengan demikian pada bagian bola bahan yang dipakai harus mempunyai ketahanan dan kekerasan sangat tinggi.

Pengujian Struktur Mikro



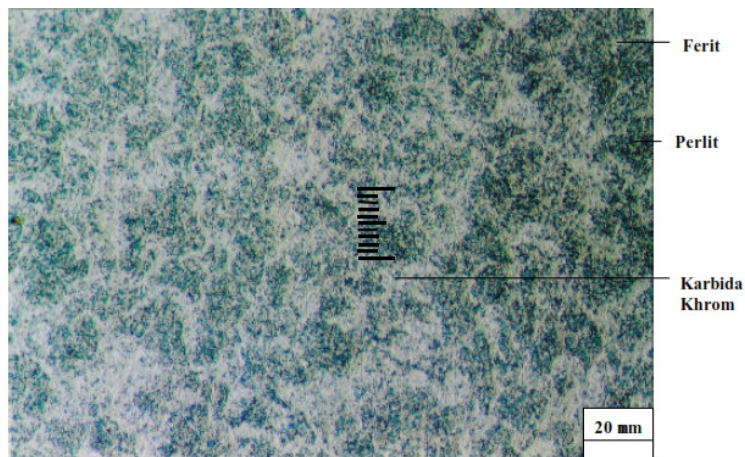
Gambar 5. Foto struktur mikro *outer bearing* merk SKF dengan pembesaran 500x

Sesuai yang ditunjukkan pada gambar 5, pada bagian *outer bearing* merk SKF menunjukkan karbida krom yang berbentuk butiran bulat kecil-kecil di dalamnya warna terang yang bersifat keras dan getas dekat dengan kristal khrom. Kristal-kristal berwarna gelap/hitam adalah perlit. Ferit yang bersifat lunak didapatkan berwarna putih di semua tempat maka keausan akan tinggi.



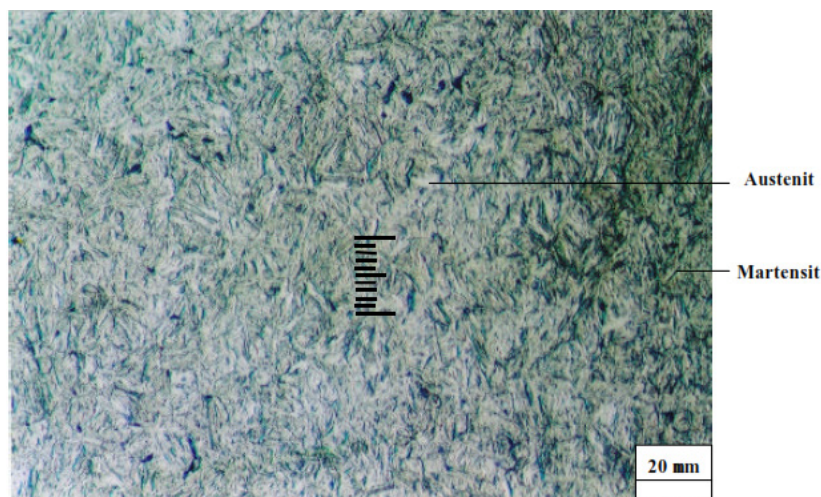
Gambar 6. Foto struktur mikro *outer bearing* merk FMB dengan pembesaran 500x

Gambar 6 menunjukkan hasil uji struktur mikro pada *outer bearing* merk FMB. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa butiran bulat karbida khrom pada merk ini berukuran sangat kecil dan perlit yang berwarna gelap/hitam tampak berukuran kecil sangat halus dan lembut berbetuk bintik-bintik dengan dasar ferit yang berwarna putih. Karbida khrom merupakan ikatan antara atom karbon dengan khrom dan bersifat sangat keras.



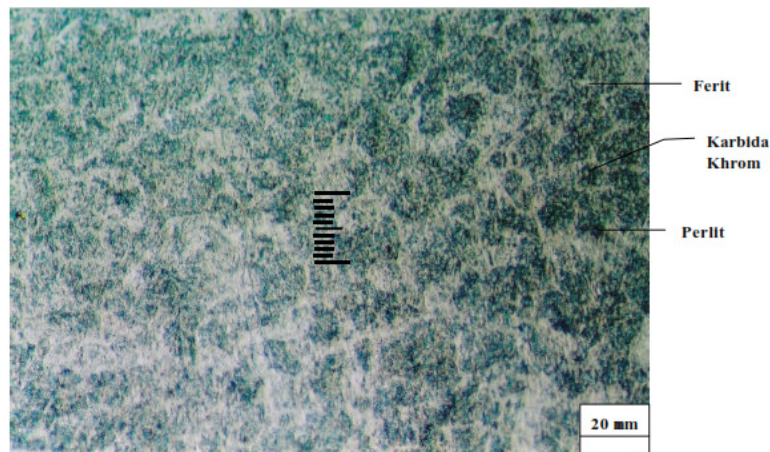
Gambar 7. Foto struktur mikro *outer bearing* merk NKK dengan pembesaran 500x

Dari gambar 7 di atas terlihat bahwa bagian *outer bearing* dari merk NKK memiliki butiran bulat kecil-kecil (karbida khrom) yang bersifat keras didapatkan merata di semua tempat dan butir perlit dengan warna gelap/hitam berukuran besar serta tebal dengan jumlah lebih banyak, sehingga berakibat merk ini memiliki harga kekerasan rata-rata tertinggi pada bagian *outer* daripada merk-merk lain.



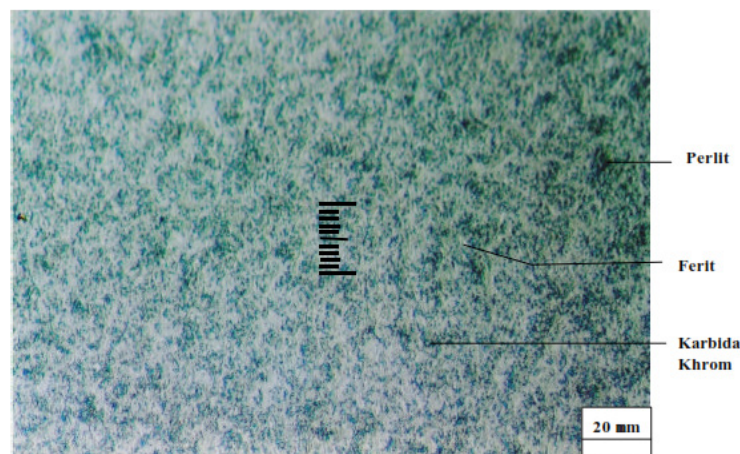
Gambar 8. Foto struktur mikro *outer bearing* merk JAL dengan pembesaran 500x

Sedangkan pada *outer bearing* merk JAL, struktur mikronya terdapat fasa martensit yang berbentuk jarum-jarum yang mempunyai kembaran dengan warna gelap/hitam seperti ditunjukkan pada gambar 8. Pada merk ini juga didapatkan sisa austenit yang tidak bertransformasi dengan warna terang sebagai latar belakang. Bentuk dan ukuran jarum-jarum martensit yang besar menunjukkan adanya pertumbuhan butir yang menimbulkan kegetasan, sehingga pada merk JAL bagian *outer* harga kekerasan rata-rata menduduki posisi terendah.

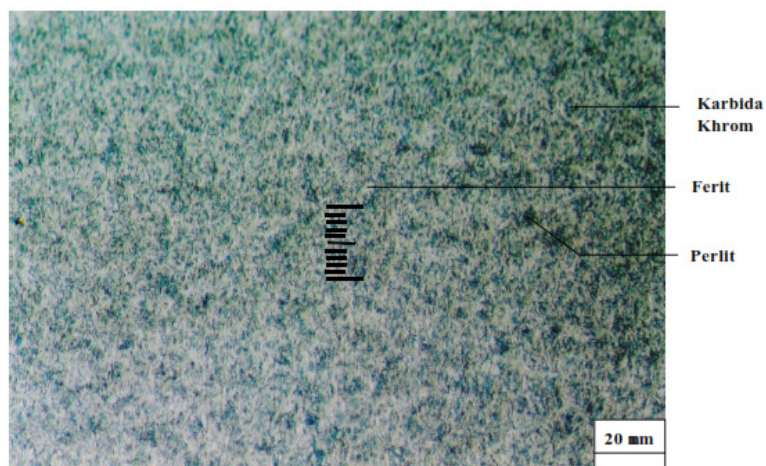


Gambar 9. Foto struktur mikro *ball bearing* merk SKS dengan pembesaran 500x

Pada bagian *ball bearing* merk SKF yang ditunjukkan pada gambar 9 menunjukkan bahwa karbida khrom (butiran bulat kecil-kecil) yang larut dalam matriks ferit berwarna putih tersebar merata. Butiran-butiran halus perlit yang berwarna gelap/hitam membentuk lapisan-lapisan yang tebal dalam jumlah banyak. Hal ini menyebabkan harga kekerasan rata-rata naik pada posisi tertinggi.

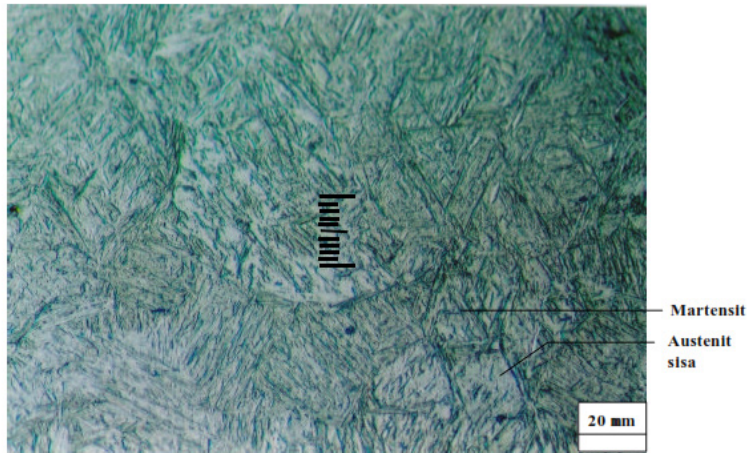


Gambar 10. Foto struktur mikro *ball bearing* merk FMB dengan pembesaran 500x



Gambar 11. Foto struktur mikro *ball bearing* merk NKK dengan embesaran 500x

Gambar 10 memperlihatkan bahwa pada *ball bearing* merk FMB, penyusun struktur mikro tetap sama yaitu perlit dan karbida khrom, hanya kondisi yang membedakan adalah ketebalan butiran perlit dan lapisan yang agak tipis. Pada merk NKK, perlit yang berwarna gelap/hitam berkurang ketebalan dan area ferit bertambah luas sehingga kekerasannya akan berkurang (gambar 11).

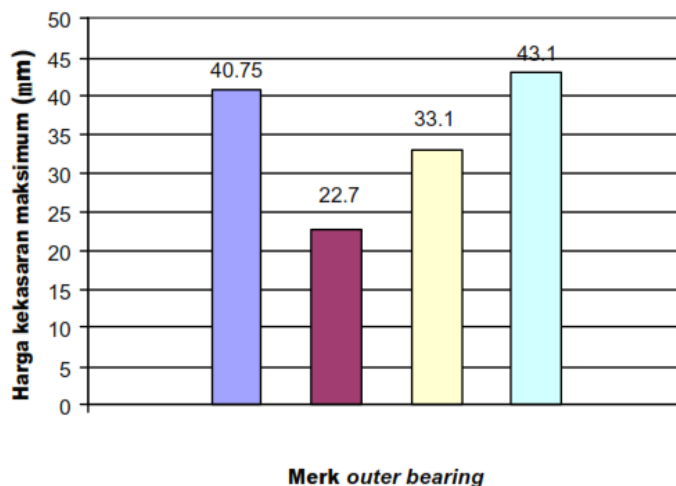


Gambar 12. Foto struktur mikro *ball bearing* merk JAL dengan pembesaran 500x

Untuk bagian *ball bearing* merk JAL, bentuk struktur menunjukkan kemungkinan pencelupan dengan minyak setelah pemanasan pada temperatur tinggi. Seperti yang terlihat pada gambar 12, pada merk ini terdapat austenit sisa berwarna putih dan martensit bilah terdiri dari kelompok-kelompok bilah yang dipisahkan oleh batas butir bersudut kecil atau besar.

Pengujian Kekasaran

Karena pada bagian cincin luar (*outer bearing*) baik kondisi berputar atau diam tetap mengalami gesekan dengan bagian yang ditempatinya maka perlu dievaluasi kekasaran permukaannya. Dengan demikian dapat diketahui tingkat ketelitian atas kehalusan permukaan, dimana hal ini sangat berpengaruh terhadap kondisi ketenangan dalam operasional dan umur panjang.



Gambar 13. Histogram kekasaran maksimum *outer bearing*

Dari pengujian kekasaran pada bagian *outer bearing* didapatkan data bahwa merk JAL memiliki harga kekasaran tertinggi, diikuti dengan merk SKF, NKK, dan terendah adalah FMB seperti yang ditunjukkan pada gambar 13. Pada merk JAL dengan harga kekasaran permukaan tertinggi pada bagian *outer* maka pada bagian permukaan terdapat bagian berongga/lembah dan puncak. Sehingga partikel-partikel halus yang terlepas akan mudah terperangkap dalam bantalan sehingga dapat menimbulkan panas dan getaran di atas normal. Kekasaran permukaan tinggi menyebabkan adanya rongga, dengan demikian terdapat beberapa bagian permukaan yang longgar maka lama kelamaan dalam pemakaian akan mudah menimbulkan slip dan terjadi getaran pada waktu bantalan berputar dengan arah beban yang tidak menentu.

Di sisi lain, merk FMB dengan harga kekasaran permukaan rendah pada bagian *outer* maka *outer* akan terpasang pada tempatnya dengan lebih kuat. Sebab jika pemasangan tersebut longgar akan memungkinkan gesekan yang terjadi antara tempat atau dudukan dengan cincin luar (*outer bearing*) yang terpasang tersebut sehingga mengakibatkan keausan pada permukaan pasan.

KESIMPULAN

Jika ditinjau secara umum berdasarkan kekuatan, kekerasan (ketahanan aus) serta kekasaran permukaan pada bagian *outer bearing* dan *ball bearing* maka merk yang memenuhi kualitas optimum adalah merk FMB karena sudah mencukupi dengan parameter kerja bantalan sehingga membuat umur pakai lebih panjang pada aspek penggunaan yang sama.

DASAR PUSTAKA

- [1] Soelarso, Suga. K. 1991. *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [2] Donald S. Clark. 1973. *Physical Metallurgy for Engineer*. New York: American Book.
- [3] De Garmo E. P. 1969. *Materials and Processes in Manufacturing, Mac Millan Company*. New York.

RANCANG BANGUN *MOLD* UNTUK PROSES *TERMOFORMING* *PROSTHETIC BELOW KNEE (B/K)*

Bambang Waluyo F., Aris Aryanto, Tri Widodo Besar R.

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Pabelan Tromos Pos I Pabelan, Kartasura

Email: bambang_waluyo@ums.id

ABSTRAK

Industri semakin berkembang, kebutuhan terhadap plastik pun semakin bertambah. Akan tetapi, dalam aplikasi proses pembentukan plastik sering mengalami kendala. Salah satunya adalah penyusutan. Penyusutan sering terjadi pada proses pembentukan plastik, terutama pembentukan dengan sistem mechanical thermoforming. Sehingga perlu dianalisis hal-hal yang menyebabkan penyusutan pada produk yang dihasilkan. Beberapa hal yang diidentifikasi mempengaruhi terjadinya penyusutan adalah bentuk mold, temperatur, dan jenis plastik yang digunakan.

Metode penelitian yang digunakan adalah membuat alat uji mechanical thermoforming dan membuat mold yang akan digunakan untuk menganalisis penyusutan. Mold yang digunakan ada 2 macam, yaitu mold telapak kaki atas dan mold telapak kaki bawah. Selain variasi pada mold, analisis juga ditujukan pada temperatur plastik polypropylene (PP) dan plastik PVC yang akan diproses. Variasi temperatur yaitu: 100°C, 120°C, dan 140°C. Sedangkan jenis plastik yang diujikan adalah plastik polypropylene (PP) dan plastik PVC.

Dari data hasil pengujian dan pembahasan pada proses mechanical thermoforming untuk plastik polypropylene (PP) dengan ketebalan 1,0 mm tidak dapat dianalisis persentase penyusutan yang terjadi karena sifat viskos pada plastik rendah. Pada plastik jenis PP ini meskipun membentuk pola, tetapi tidak sempurna. Bahan plastik PP setelah proses penekanan dengan temperatur 100°C-120°C plastik tidak mengalami pemuaihan yang cukup baik, karena plastik masih bersifat elastik. Pada temperatur 140°C plastik mengalami pemuaihan, tetapi saat proses penekanan plastik mengalami bentuk pola yang tidak sempurna, karena temperatur terlalu tinggi. Sedangkan pada plastik PVC didapatkan hasil bahwa pada mold telapak kaki atas dengan ketinggian 2 cm dan tebal plastik 1,0 mm menghasilkan persentase penyusutan rata-rata 7,85% dengan temperatur 100°C, 9,80% dengan temperatur 120°C dan 12,11% dengan temperatur 140°C. Pada mold telapak kaki bawah dengan ketinggian 2 cm dan tebal plastik 1,0 mm menghasilkan persentase penyusutan rata-rata 10,01% dengan temperatur 100°C, 10,96% dengan temperatur 120°C dan 12,08% dengan temperatur 140°C.

Kata Kunci: *Mechanical thermoforming, penyusutan plastik, mold*

ABSTRACT

The growing of industry has the effect to the increase of plastic need. However, the application of plastic forming process often experiences constraints. One of them is depreciation. Depreciation often occurs in the plastic forming process, especially

forming with mechanical thermoforming system. So it is necessary to analyze the things that cause shrinkage on the product. Some of the things that are identified to influence the shrinkage are the molds, temperatures and types of used plastics.

The used method is to make mechanical thermoforming test and make mold which will be used to analyze depreciation. There are 2 kinds of molds, namely upper foot sole mold and bottom foot sole mold. In addition to the variations of the mold, the analysis is also aimed at the temperature of polypropylene plastic (PP) and PVC plastic which will be processed. The temperature variations are 100°C, 120°C and 140°C and the types of plastics that are tested is polypropylene plastic (PP) and PVC plastic.

The results show that on mechanical thermoforming process for polypropylene (PP) plastic with 1.0 mm thickness, the percentage of shrinkage can not be analyzed because of the low viscous nature of plastic. PP type plastic can form a pattern, but not perfect. PP plastic material does not experience a good expansion after pressing process with 100°C-120°C plastic temperature. This is because the plastic is still elastic. At 140°C, the plastic undergoes expansion, but when the plastic pressing process, it undergoes an imperfect pattern. The reason is the temperature is too high. Meanwhile for the PVC plastic, it was found that in the upper foot sole mold with height of 2 cm and 1.0 mm plastic thickness, the percentages of shrinkage average are 7.85% with temperature 100°C, 9.80% with temperature 120°C and 12.11% with temperature of 140°C. In the bottom foot sole mold with 2 cm height and 1.0 mm plastic thickness, the percentages of shrinkage average are 10.01% with temperature 100°C, 10.96% with temperature 120°C and 12.08% with temperature 140°C.

Keywords: *Mechanical thermoforming, plastic shrinkage, mold*

PENDAHULUAN

Adanya kecenderungan yang terus naik setiap tahunnya atas penderita kecacatan yang mengalami amputasi di Indonesia yang mana data pasiennya dapat diwakili dari Rumah Sakit Orthopedi (RSO) Prof. Dr. Soeharso Surakarta, yang merupakan rumah sakit rujukan orthopedi yang ada di Indonesia. Pada akhir tahun 2006 menunjukkan data terjadinya kasus amputasi anggota gerak bawah kaki adalah sebesar 25% per tahunnya. Selama waktu antara tahun 2005 sampai dengan tahun 2006, permintaan berbagai *prothese* ataupun *orthese* yang dikerjakan oleh Unit Kerja Instalasi *Prothese* dan *Orthese* Rumah Sakit Orthopedi Surakarta rata-rata sebanyak 60 unit per bulannya [1].

Selama ini *prothese* yang diproduksi baik yang dihasilkan oleh Rumah Sakit Orthopedi atau industri kecil yang ada di Kota Solo masih mengutamakan fungsinya sebagai kosmetik. Sedangkan *prothese* kaki yang berfungsi sebagai alat bantu (*artificial*) dalam menjalankan aktivitas sehari-hari masih belum terakomodasi secara baik. Hal ini terlihat pada pengguna *prothese* kaki pada saat melakukan langkah berjalan secara normal masih terlihat adanya *phase* berjalan yang kurang baik yang diakibatkan oleh dampak kecacatan, terlebih bilamana berjalan naik dan menuruni anak tangga yang cukup tinggi ataupun turun dari bus kota. Atas gambaran kondisi ini bahwa *prothese* kaki yang ada masih belum memenuhi aspek fungsinya secara baik yang antara lain mampu menopang berat tubuh yang nyaman, aman, stabil, kuat, dan ringan.

Pembuatan *prothese* kaki memiliki tingkat kesulitan yang cukup tinggi dan waktu dibutuhkan untuk pemesanannya cukup lama. Terlebih untuk proses pembuatan *prothese* kaki di bawah lutut memerlukan banyak sekali bagian komponen pendukung yang meliputi korset paha, soket betis, *knee*, *adaptor* dan *SACH* (*Solid Ankle Cushioned Heel*) *foot*. Lamanya waktu menunggu bagi pasien atas *prothese* yang diperlukan waktu sampai satu bulan dari

hari setelah pengukuran, di sisi lain penggunaan dari lamanya jangka waktu penggunaan komponen produk *prothese* kaki cukup pendek. Rata-rata komponen bertahan sekitar tiga tahun, pendekatan *life cycle* komponen produk *prothese* kaki diakibatkan oleh frekuensi gerakan aktivitas penggunaan sehari-hari.

Hasil kajian dari penelitian yang telah dilakukan oleh Lobes Herdiman dan Fabianus Suryono (2007) menunjukkan bahwa proses pembuatan *prothese* kaki di lingkungan Rumah Sakit Orthopedi dan instalasi kecil yang ada di kota Solo masih sangat sederhana. Mereka mengedepankan proses pembuatan *handcrafting* dan teknologi proses manufaktur yang digunakan masih bersifat konvensional [1,2]. Proses pembuatan *prothese* kaki yang dilakukan secara *handcrafting* muncul beberapa permasalahan yang dihadapi yaitu lamanya waktu menunggu untuk pemesanan dan lamanya waktu penyesuaian antara *prothese* dengan pasien setelah menggunakan produk yang dikerjakan. Bantuan teknologi telah dimungkinkan untuk dimanfaatkan proses perencanaan dan perancangan produk dari beberapa bagian komponen *prothese* kaki khususnya, melalui pemanfaatan teknologi *thermoforming* banyak hal yang dapat dikerjakan yaitu meningkatkan ketepatan ukuran produk, mampu keterulangan dalam pembuatan secara baik dan kesederhanaan proses penyesuaian produk. Kelebihan yang ditawarkan oleh proses *thermoforming* pembuatan *prothese* kaki adalah memperbaiki rancangan, meningkatkan kenyamanan pengguna produk, kemudian dalam fabrikasi dan penyesuaian pada produk atau komponen *prothese*.

Berdasarkan gambaran di atas, proses pembuatan *prothese* kaki yang ada di Indonesia sudah waktunya untuk melakukan terobosan dalam menggunakan teknologi *thermoforming*, agar dapat meningkatkan dalam pembuatan *prothese* kaki melalui upaya peningkatan adaptasi pengembangan teknologi. Adanya pengembangan penguasaan teknologi pembuatan *prothese* kaki ini akan memperkuat industri kecil yang ada di Kota Solo secara khususnya dengan memiliki daya saing yang cukup baik. Sekaligus mampu mempercepat dalam pembuatan *prothese* kaki yang dipesan oleh pasien, dan terutama bagi negara Indonesia tidak lagi ketergantungan terus akan produk impor, meskipun pasar di Indonesia sangat menjanjikan bilamana diikuti dengan daya beli masyarakat. Sama halnya juga pada pasien yang cacat dikarenakan sesuatu hal yang harus mengalami amputasi dan tidak punya alternatif penawaran lain atas *prothese* kaki yang ada.

Tantangan pada penelitian ini adalah difokuskan pada *mechanical thermoforming*, pembuatan *mold* dengan *gips* dan komponen *SACHfoot* dengan plastik. Kemudian bahan yang digunakan dalam penelitian adalah dari plastik dengan menggunakan proses *thermoforming*. Diharapkan penelitian ini dapat meningkatkan rancangan *prothese* kaki dengan bentuk yang komponen yang lebih *costumerize* dan dapat dikembangkan secara masal produk tersebut.

METODOLOGI

Pembuatan Alat Uji

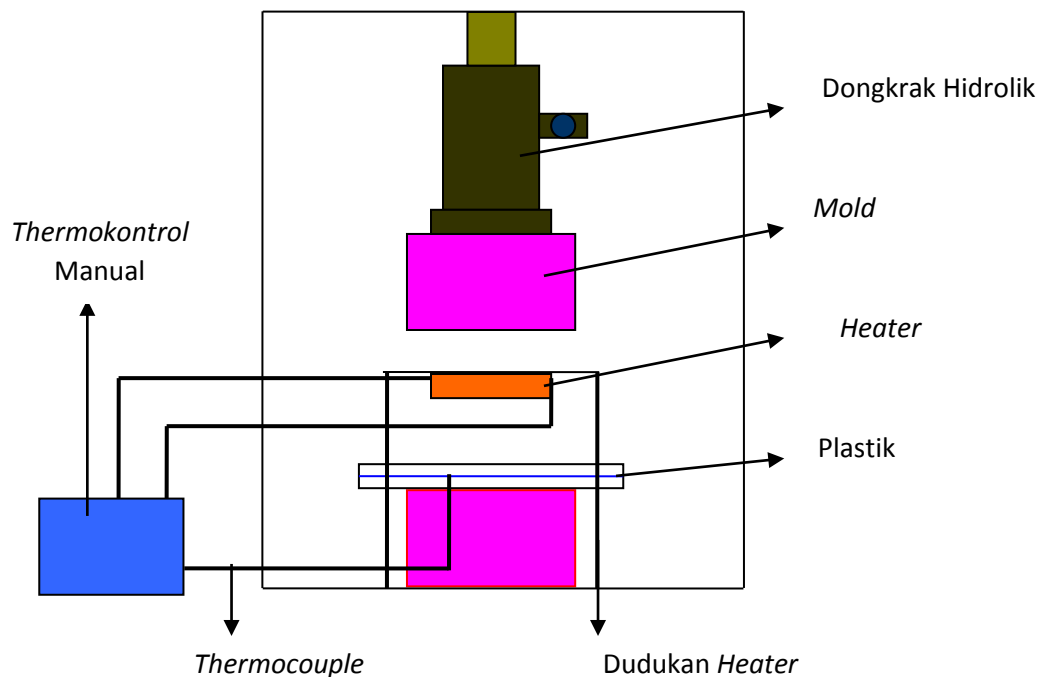
Pembuatan alat uji, yaitu *mechanical thermoforming* menggunakan banyak material dan peralatan [4-8]. Bahan dan peralatan yang digunakan akan dijabarkan pada halaman berikutnya. Selain alat dan bahan yang digunakan, proses pembuatan *mold* juga akan dijabarkan di sini. Sketsa alat uji *mechanical thermoforming* dapat dilihat pada gambar 1.

Peralatan yang digunakan untuk membuat alat uji

1. Mesin las listrik
Mesin las listrik berguna untuk mengelas rangka *mold*, rangka *heater*, dan rangka penjepit plastik.
2. Mesin gerinda tangan
Mesin gerinda tangan berguna untuk meratakan permukaan hasil pengelasan, misalnya

pada permukaan rangka setelah disambung dengan las agar permukaan lebih halus sehingga tampak rapi.

3. Mesin bor
Mesin bor berguna untuk membuat lubang pada rangka *modal*, rangka dudukan *heater* dan rangka penjepit plastik.
4. Satu set *tool*
Satu set *tool* berguna untuk alat bantu pembuatan rangkaian *mechanical thermoforming*.



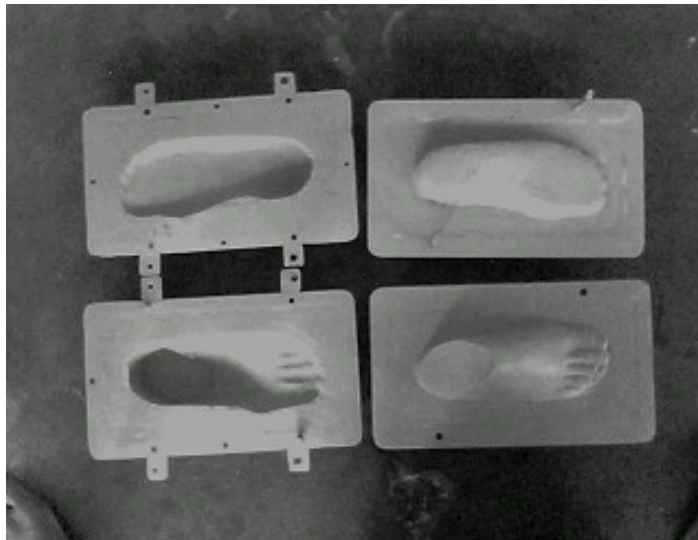
Gambar 1. Sket alat uji *mechanical thermoforming*

Bahan yang digunakan untuk membuat alat uji

1. Besi siku
Besi siku berguna sebagai rangka *modal*, rangka dudukan *heater* dan rangka penjepit plastik.
2. Seng
Seng digunakan untuk membuat penutup pada rangka *modal*.
3. Alat pengikat
Mur baut berguna sebagai pengikat. Misalnya antara *modal* positif dengan penekan dongkrak dan antara penjepit plastik dengan *modal* negatif.

Pembuatan *modal* [3-8]

Modal dibuat dari *gypsum* dengan campuran *gips* dan air (PDAM). Komposisi pencampuran antara *gips* sebesar 70% dan air (PDAM) sebesar 30% diaduk sampai kental. Proses berikutnya adalah *gypsum* dituang ke dalam cetakan, kemudian di-*finishing* sampai berbentuk menyerupai pola kaki. Adapun bentuk *modal* tersebut adalah berbentuk $\frac{1}{2}$ kaki, 2 *modal* positif dan 2 *modal* negatif. Model 4 *modal* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Dua *mold* positif dan dua *mold* negatif

Peralatan yang digunakan dalam penelitian

Ada beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian, di antaranya adalah:

1. Pemanas atau *heater*
Pemanas yang digunakan adalah *heater* dengan daya 1000 Watt. Alat ini digunakan untuk memanaskan lembaran plastik dari salah satu sisi saja yaitu sebelah atas.
2. *Thermocontrol*
Thermocontrol yang digunakan adalah *thermocontrol* manual, fungsinya untuk mengetahui temperatur bahan plastik, kemampuan panas hingga mencapai 400°C dan kuat arus 15 Ampere.
3. Dongkrak hidrolik
Dongkrak hidrolik berfungsi sebagai alat penekan bahan lembaran plastik agar terbentuk sesuai dengan bentuk *mold* . Dongkrak hidrolik memiliki daya tekan beban sampai 20 Ton.
4. Gelas ukur dan air (PDAM)
Gelas ukur dan air berfungsi sebagai alat pengukur cairan, dengan alat ini dapat diketahui besarnya simpangan penyusutan pada penelitian yang dilakukan.

Bahan penelitian

1. Lembaran plastik PVC dan PP
Bahan penelitian didapat dari toko Morodadi yang berlokasi di Surakarta. Bahan yang digunakan ini adalah lembaran plastik *polypropylene* (PP) ketebalan 1.0 mm dengan ukuran (40 x 15) cm dan lembaran plastik PVC ketebalan 1.0 mm dengan ukuran (40 x 15) cm. Alasan pemilihan bahan ini adalah karena merupakan jenis plastik yang mudah dibentuk, banyak dipasaran, ringan, dan modern.
2. Gibs
3. Resin
4. Katalis
Bahan ini berfungsi sebagai pengeras, apabila dicampur dengan campuran resin.
5. Cat warna

Langkah pengerjaan penelitian

Tahapan-tahapan yang akan dilakukan adalah:

1. Persiapan
Sebelum percobaan dimulai, perlu disiapkan semua bahan dan peralatan pendukung yang akan digunakan. Kertas dan alat tulis yang akan digunakan untuk mencatat semua data hasil pengujian harus juga disiapkan.
2. Pemotongan dan pemasangan plastik
Lembaran plastik dipotong dengan ukuran 40x25 cm, sesuai dengan ukuran penjepit plastiknya dan kemudian plastik dipasang pada *mold* negatif setelah itu plastik dijepit. Pemasangan dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3 Pemasangan plastik pada penjepit

3. Pemasangan kabel pada pemasangan pada mesin
Plastik yang sudah terpasang pada *mold* negatif dan sudah dijepit, setelah itu *thermocouple* diletakkan pada bagian bawah plastik tersebut agar dapat terdeteksi temperatur plastik pada *thermocouple* manual.
4. Pemasangan dongkrak hidrolik pada *mold*
Pemasangan dongkrak hidrolik pada *mold* positif diletakkan di atas cetakan dan penekanan *mold* dengan arah ke bawah.
5. Pemrosesan bahan
Bahan yang sudah dijepit kemudian dipanasi dengan menggunakan *heater* dengan temperatur yang sudah ditentukan disertai pemasangan *thermocouple* manual untuk mengetahui temperatur pada bahan. Setelah tercapai temperatur yang sudah ditentukan, kemudian *mold* positif sampai posisi menekan bahan. Bersamaan dengan penekanan dongkrak hidrolik, sehingga proses penekanan plastik oleh *mold* dapat berlangsung. Setelah plastik terbentuk sesuai bentuk *mold* , maka dilakukan pendinginan dengan udara agar bentuk produk yang dihasilkan tidak berubah. Setelah proses *mechanical thermoforming* sudah selesai, dongkrak dapat dinaikan lagi ke posisi semula dan produk hasil *mechanical thermoforming* dapat dikeluarkan.

Cara memperoleh data

Untuk mengidentifikasi penyusutan yang terjadi pada lembaran plastik *polypropylene* (PP) dan PVC dari hasil proses *mechanical thermoforming* adalah Proses *mechanical thermoforming* pada plastik *polypropylene* (PP) dan PVC dengan variasi temperatur. Sehingga didapatkan 18 pengujian plastik PVC dan 18 pengujian plastik *polypropylene* (PP) maka masing-masing percobaan pada kondisi yang sama sebanyak 3 kali. Adapun yang akan dianalisis pada pengujian ini adalah:

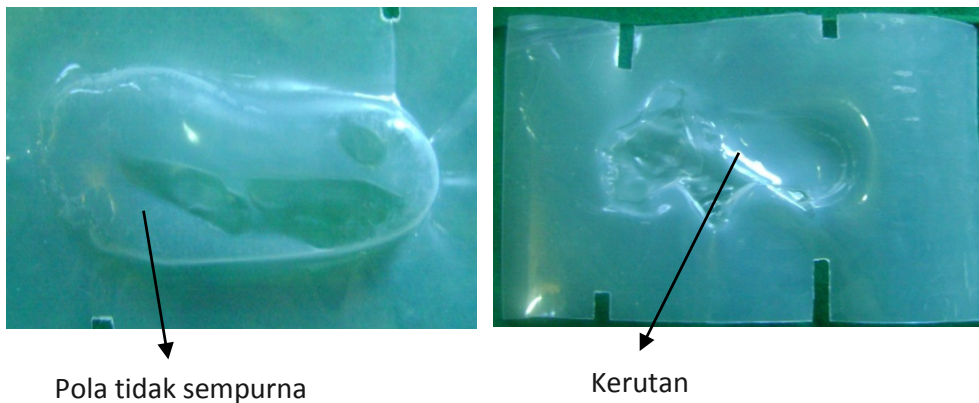
1. Persentase penyusutan terhadap volume pada plastik hasil cetak pada proses *mechanical thermoforming* .
2. Temperatur yang paling sesuai pada tiap-tiap variasinya agar didapatkan persentase penyusutan yang paling kecil.

Setelah data yang dibutuhkan didapat, kemudian dianalisis penyebab-penyebab dari terjadinya penyusutan tersebut berdasarkan teori yang ada.

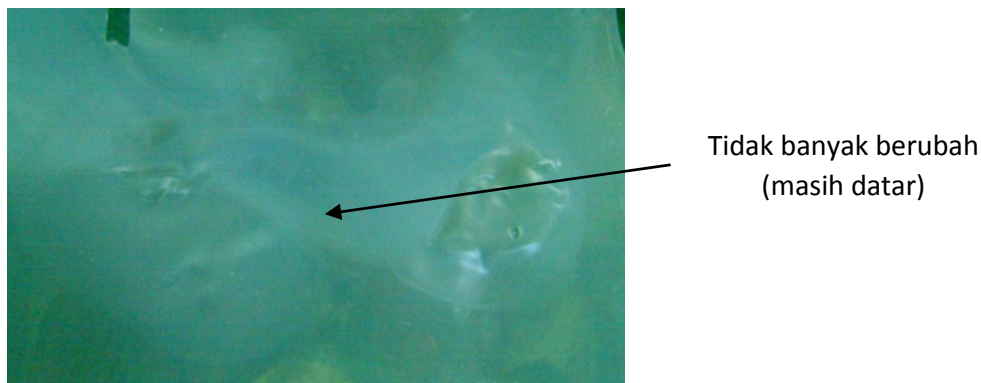
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Mold Menggunakan Plastik *Polypropylene* (PP)

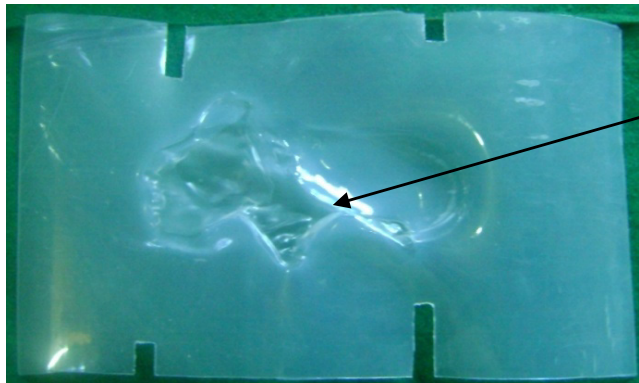
Pada gambar 4 ditunjukkan foto hasil dari proses *mechanical thermoforming*. Pada plastik jenis PP ini tebal yang digunakan adalah 1.0 mm sehingga material yang akan diproses *mechanical thermoforming* sangat tebal. Plastik jenis ini, dengan menggunakan proses *mechanical thermoforming* bertemperatur 100°C, 120°C dan 140°C sering terjadi pola tidak sempurna dan kerut. Pada plastik jenis PP ini tidak dapat dianalisis persentase penyusutan yang terjadi, meskipun membentuk pola seperti bentuk *mold* karena sifat viscos pada plastik PP ini rendah. Bahan plastik PP setelah mengalami proses penekanan dengan temperatur 100°C-120°C plastik tidak mengalami pemuaihan yang cukup baik, karena itu plastik masih bersifat elastik. Pada temperatur 140°C plastik mengalami pemuaihan yang baik, tetapi saat proses penekanan plastik mengalami bentuk pola yang tidak sempurna, karena temperatur terlalu tinggi. Hasil analisis dapat dilihat pada gambar 5 sampai 7



Gambar 4. Foto hasil *mechanical thermoforming*

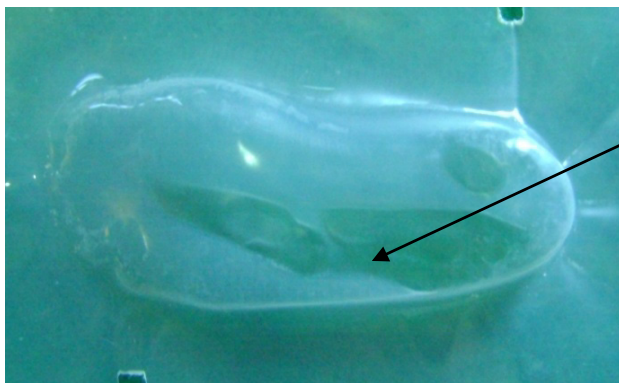


Gambar 5. PP diproses dengan *mold* telapak kaki atas dan *mold* telapak kaki bawah temperatur 100°C



Tidak membentuk pola

Gambar 6. PP diproses dengan *mold* telapak kaki atas dan *mold* telapak kaki bawah temperatur 120°C



Membentuk pola tapi tidak sempurna

Gambar 7. PP diproses dengan *mold* telapak kaki atas dan *mold* telapak kaki bawah temperatur 140°C

Pengujian *Mold* Menggunakan Plastik PVC

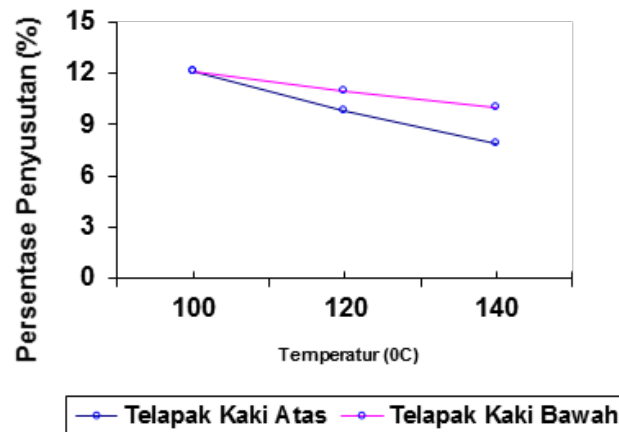
Penyusutan adalah cacat perubahan dimensi ukuran pada *mold* , maka ukuran produknya akan berbeda, yaitu ukuran luar benda kerja akan lebih kecil dibanding dengan ukuran cetakan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 8.



Penyusutan

Gambar 8. Contoh penyusutan pada plastik PVC

Perbandingan *Mold* Telapak Kaki Atas dan Bawah



Gambar 9. Grafik hubungan bentuk *mold* terhadap persentase penyusutan

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara perbedaan temperatur terhadap persentase penyusutan ditinjau dari setiap bentuk *mold*, yaitu *mold* telapak kaki atas dan *mold* telapak kaki bawah. Pada semua variasi bentuk *mold* untuk temperatur 100°C persentase penyusutan hampir sama yaitu kurang lebih 12%. Ini terjadi karena pada temperatur tersebut pemuaihan plastik belum maksimal, sehingga terjadi penyusutan saat penekanan *mold* pada proses *mechanical thermoforming*. Selain itu, pada temperatur tersebut sering terjadi gagal produk dikarenakan pemuaihan plastik yang dibutuhkan belum mencukupi, sehingga tidak bisa membentuk pola secara sempurna. Pada semua bentuk *mold* dari ketinggian 2 cm semuanya terdapat penyusutan, hal ini terjadi karena tebal plastik PVC adalah 1,0 mm sedangkan pemuaihan panjang hanya 1-5,5 cm. Sehingga plastik yang memuai sebenarnya bisa lebih dari 1 cm tetapi hanya ditekan sampai 1-5,5 cm, maka sisa dari pemuaihan plastik yang tidak mulur akan menyebabkan terjadinya penyusutan. Oleh karena itu, pada bentuk *mold* telapak kaki atas mempunyai persentase penyusutan yang paling rendah dibandingkan dengan bentuk *mold* telapak kaki bawah.

Semua persentase penyusutan pada *mold* telapak kaki atas menunjukkan antara 7,85%-12,11%. Sedangkan untuk *mold* telapak kaki bawah persentase penyusutan cenderung naik antara 10,01%-12,08%. Maka *mold* telapak kaki atas lebih cocok untuk produk yang dihasilkan. Secara umum, untuk kedua bentuk *mold* dengan beberapa variasi temperatur, persentase penyusutan yang terjadi adalah semakin tinggi temperatur maka nilai penyusutan semakin kecil dan semakin rendah temperatur maka nilai penyusutan paling besar. Dari gambar 9 dapat dianalisis yaitu pada temperatur 140°C mempunyai pemuaihan yang tepat untuk *mold* telapak kaki atas dan *mold* telapak kaki bawah. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi *mechanical thermoforming*, tetapi yang paling utama adalah bentuk ketinggian *mold* dan temperatur [9-10].

Tidak meratanya temperatur dan bentuk *mold* ini mengakibatkan perbedaan tekanan yang dibutuhkan. Semakin tinggi temperatur, tegangan yang dibutuhkan semakin kecil, sedangkan tekanan yang diberikan ke plastik sama. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya penyusutan. Bagian plastik yang temperaturnya lebih tinggi akan terjadi penyusutan lebih kecil. Sedangkan pada bagian yang temperaturnya lebih rendah dari batas *forming* tidak membentuk dengan sempurna. Meskipun plastik yang temperaturnya berada pada *toleransi forming* (pembentukan) lebih banyak, tetapi apabila dibentuk bersama dengan bagian plastik yang berada pada temperatur lebih atau kurang dari toleransi mengakibatkan terjadinya

penyusutan. Besarnya penyusutan yang terjadi tergantung dari penyebaran temperatur yang terjadi pada plastik tersebut.

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan tentang "Analisis Penyusutan Pada Lembaran Plastik *Polypropylene* (PP) dan Plastik PVC Hasil Proses *Mechanical Thermoforming*" dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Proses *mechanical thermoforming* pada plastik *polypropylene* (PP) dengan ketebalan 1,0 mm tidak dapat dianalisis karena sifat *viskos* pada material rendah. Sedangkan pada plastik PVC dengan ketebalan 1,0 mm dengan variasi temperatur yaitu mulai dari 100°C, 120°C, dan 140°C. Persentase penyusutan paling kecil adalah pada temperatur 140°C.
2. a. *Mold* dengan model *mold* telapak kaki atas dan *mold* telapak kaki bawah cocok untuk plastik PVC dengan ketebalan 1,0 mm dapat dianalisis persentase penyusutannya yang terjadi karena sifat *viskos* pada material tinggi. Sedangkan pada plastik *polypropylene* (PP) dengan ketebalan 1,0 mm hasilnya tidak dapat membentuk pola.
- b. Temperatur yang optimal untuk plastik *polypropylene* (PP) dengan tebal 1,0 mm tidak dapat dianalisis karena hampir semua percobaan rusak atau tidak masuk kriteria. Sedangkan temperatur yang optimal untuk plastik PVC dengan ketebalan 1,0 mm adalah 140°C menghasilkan persentase penyusutan paling kecil, untuk 120°C persentase penyusutan lebih besar dari temperatur 140°C. Kalau temperatur 100°C terlalu rendah, sehingga penyusutan semakin tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Herdiman, L., 2007. *Pengembangan Karakteristik Fungsi Prothese Kaki Jenis Above Knee Amputation dengan Teknologi Computer Aided Engineering (CAE)*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- [2] Suryono, A.F., 2007. *Kajian dalam Pengembangan Rancangan Sach Foot Pengguna Prothese Jenis Below Knee Amputation Berdasarkan Penekanan Biomekanika*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- [3] Combe, E.C., 1992. *Pembuatan Cetakan dari Gypsum*. Diakses 15 Juni 2009 dari www.google.com/gypsum
- [4] Bralla, James, G., 1998. *Design for Manufacturability Handbook*. McGraw-Hill Companies.
- [5] Groover, M. P., 1996. *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials Processes and System*, Prentice-Hall.
- [6] Kalpakjian, Serope and Steven R. Schmid, 2003. *Manufacturing Process for Engineering Materials*, fourth Edition. Illinois Institute of Technology, Chicago.
- [7] Ma'arif, S., 2009. *Analisis Warpage Pada Lembaran Plastik Polyethylene (PE) dan Polypropylene (PP) Hasil Proses Vacuum Thermoforming*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [8] Schey, J. A., 2000. *Introduction to Manufacturing Process*, McGraw Hill.

- [9] Saito, S., Surdia, T., 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- [10] Smith, William F. and Javad Hashemi, 2006. *Foundations of Materials science and Engineering*, McGraw Hill.