

## **ANALISA CACAT *DRILLING* DARI MATERIAL *HYBRID* KOMPOSIT LAMINASI SERAT KARBON-BASALT-EPOXY**

**Henry Widya Prasetya<sup>1)</sup>, Wayan Nata Septiadi<sup>1)</sup> dan I.D.G Ary Subagia<sup>1,2)\*</sup>**

<sup>1)</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana  
Kampus Bukit Jimbaran Badung-Bali (80362)

Email: ndoroheny@gmail.com, wayan.nata@gmail.com

<sup>2)</sup> Advance material and Automobile Tech. Center, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana,  
Kampus Bukit Jimbaran Badung-Bali (80362)  
Email: arsubmt@me.unud.ac.id

### **Abstrak**

Proses permesinan pada mesin perkakas merupakan salah satu jenis proses pembuatan komponen benda kerja. Salah satu proses pemotongan bahan adalah proses drilling. Penelitian ini dilakukan adalah untuk mengamati cacat pada material komposit akibat drilling proses. Material komposit dengan laminasi serat penguat karbon dan basalt telah digunakan. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh drilling terhadap cacat pinggir yang terjadi pada hybrid komposit. Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental. Variasi ukuran pahat potong adalah berdiameter 8 mm dan 10 mm. Proses permesinan dilakukan dengan kondisi pemotongan dry process dan wet process. Hasil proses permesinan drilling akan di investigasi dengan scanning electron microscope (SEM) dan analisa data menggunakan software computer ImageJ. Hasil penelitian menunjukkan bahwa : (1) kenaikan mata bor tidak signifikan memberikan pengaruh nilai stress area yang terbentuk; (2) temperatur pemotongan akibat gesekan antara mata bor dengan permukaan material memberikan pengaruh terhadap nilai stress area sebelum material tersebut terdeformasi, hal ini kondisi pemotongan yang sangat berperan.

**Kata kunci:** Hybrid composite, Serat carbon, Serat basalt, Drilling, Daerah cacat.

### **Abstract**

*The machining process is one type in work piece processing using a machine tool. The drilling was wide process in cutting work piece. This research was done to investigate the defect of composite materials against drilling process. Hybrid composite material with lamination carbon fiber and basalt fiber reinforced was carried out. The aim is to investigate the edge defect of hybrid composite against the drilling process. The experiment method was conducted in this research. The drill bit variation was used in diameter 8mm and 10mm. The machining process was conducted on dry and wet condition. The results of drilling machining process have been investigated by scanning electron microscope (SEM) and analyzed using Image J software. The results showed that: (1) a significant increase in the drill bit does not give effect to stress the value of the area; (2) cutting temperature due to friction between the drill bit to the surface of the material to give effect to stress the value of the area before the material is deformed, it is very instrumental cutting conditions.*

**Keywords:** Hybrid composite, Carbon fiber, Basalt fiber, Drilling, Defect area.

## **1. PENDAHULUAN**

Komposit adalah material alternatif yang dikembangkan sebagai pengganti material tradisional sejak dua puluh tahun terakhir. Secara teoritis material komposit adalah dibentuk oleh dua jenis material yaitu sebagai penguat dan pengikat [1], yang mana keduanya memiliki

sifat dan karakteristik yang berbeda. Komposit dibandingkan dengan material tradisional memiliki keunggulan seperti tahan korosi, bersifat ramah lingkungan, memiliki sifat mekanik dan fisik yang sangat baik, dan murah dalam pembuatannya, serta dapat dilakukan perbaikan sifat dan karakteristik sesuai kebutuhan konstruksi, serta ringan, ramah lingkungan [1]. Akan tetapi komposit adalah sangat tidak tahan terhadap pembebanan kejut [2]. Saat ini, dalam upaya untuk meningkatkan sifat mekanis dan fisiknya telah dikenalkan metode hibridisasi dalam pembuatan material komposit. Hibridisasi adalah material komposit yang diperkuat oleh penggabungan dua sifat atau lebih penguat dalam satu pengikat atau sebaliknya untuk mendapatkan jenis material komposit dengan sifat yang baru [3]. Hibridisasi antara serat carbon dengan serat lainnya seperti gelas telah menunjukkan hasil yang cukup baik pada performance dan karakteristik. Akan tetapi, dengan sifat racun yang ditimbulkan oleh serat gelas menjadi banyak penelitian mengalih pada material lain yang dihibridisasi dengan serat karbon yaitu serat basalt[1, 4-6] . Basalt adalah bahan baru yang bersumber dari batuan gunung berapi dan secara mekanis tidak terlalu jauh perbedaannya dengan serat gelas. Akan tetapi keunggulan dari serat basalt adalah tidak bersifat racun sehingga bersifat *eco-friendly*[7].

*Drilling* adalah salah satu teknik pemotongan (pembuatan lubang) dengan menggunakan mata potong bor (*drill bit*). Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mempelajari sifat dan karakteristik material komposit akibat perlakuan *drilling*. Liu, et.al [9] telah mempelajari sifat mekanis pengeboran pada material komposit laminasi serat karbon dan serat gelas. Dijelaskan bahwa proses *drilling* sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor permesinan seperti kecepatan spindel, pemakanan, diameter *drill*, *point angle*, gaya pemotongan dan torsi serta ketebalan material yang dipelajari oleh Murthy, et.al [10] dan Karimi et.el [11]. Dalam penelitiannya, penulis menggunakan material komposit dengan penguat serat gelas (GFRP). Terhadap sifat mekanis dari komposit sebagai efek dari pengerjaan *drilling* telah juga dilakukan oleh [12-14]. Kemudian, cacat yang timbul akibat dari proses permesinan *drilling* pada material komposit telah juga dilakukan diantaranya oleh [15]. Disamping untuk material komposit dengan penguat karbon dan gelas, material komposit dengan serat alami seperti serat sisal terhadap perlakuan pemotongan *drill* juga telah diselidiki oleh [18].

Penelitian yang dilakukan belum banyak dilakukan untuk material komposit dengan menggunakan hibridisasi laminasi serat basalt dan serat karbon terhadap perlakuan *drilling*. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan dua ukuran mata bor (*drilling bit*) yaitu 8 mm dan 10 mm. Material komposit yang digunakan adalah laminasi antara serat karbon dan serat basalt dengan variasi susunan (*stacking sequences method*). Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui cacat daerah pengeboran untuk setiap variasi dimensi mata bor yang digunakan. Adapun menggunakan bantuan *scanning electron microscope* (SEM) pada *low magnification* dianalisa luas perambatan tegangan plastis yang terjadi. disamping itu juga diteliti terhadap cacat yang terjadi. Penelitian ini dilaksanakan untuk masing-masing variasi pengujian adalah sebanyak 5 kali pengulangan.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan material hibrid komposit dengan penguat serat karbon dan serat basalt. Kedua serat disusun berdasarkan variasi karbon-basalt-karbon (CBC), basalt-karbon-Basalt (BCB) dan karbon-basalt-karbon-basalt-karbon (CBCBC). Jumlah keseluruhan serat penguat adalah sebanyak 10 lapisan dengan variasi jumlah serat adalah 60% serat karbon dan 40% serat basalt. Kemudian sebagai pengikat dipergunakan epoxy resin *modified BPA epoxy resin* (HTC-667C) dengan *hardener with a modified aliphatic amine hardener* diproduksi oleh perusahaan Jet Korea Co. (Korea) [10]. Serat karbon dan serat basalt adalah berupa anyaman tunggal (*plain woven*) yang masing-masing diproduksi oleh perusahaan Hyundai Fiber Co. Ltd. Korea dengan kode product (C120-3K), dan serat *basalt* (*plain*

woven) dengan kode produk (EcoB4 F210) diproduksi oleh Seco-Tech. Korea.

Metode pembuatan hibrid komposit dilakukan dengan menerapkan teknik *injeksion molding*, yaitu *vacuum assisted resin transfer molding* (VARTM) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) dilaksanakan dalam 5 langkah yaitu : (a) persiapan cetakan dan lembaran serat penguat, (b) penyegelan cetakan dan menciptakan ruang hampa, (c) persiapan resin dan penghilangan gas yang terperangkap dalam cetakan, (d) proses injeksi resin, dan (e) proses pengeringan hasil pengecoran. Laminasi komposit dibuat melalui proses VARTM. Untuk setiap konfigurasi dari karbon-basalt / epoxy laminasi komposit, total 10 lapisan serat karbon dan basalt ditumpuk di setiap laminasi. Fraksi berat dari kedua serat adalah sekitar 62 % berat dalam setiap laminasi. Lapisan serat karbon dan basalt dengan ukuran 250 mm x 250 mm ditumpuk pada cetakan *bronze plate mold* (size : 300 mm x 300 mm), dan dibungkus dengan *vacuum bagg film* menggunakan *sealant tape* (AT200Y). Rasio larutan epoxy resin dengan *hardener* adalah 5 : 1, kemudian diinjeksikan ke cetakan melalui *vacuum pump* (-80 kPa) selama lebih dari 40 menit. Pengeringan hasil cetakan selama 2 jam pada suhu 65<sup>0</sup> C dan tekanan konstan 80 kPa [2]. -

Gambar 1 menunjukkan skema dari proses fabrikasi laminasi komposit dengan VARTM *set-up*. sedangkan Gambar 2 menunjukkan proses *drilling* dengan menggunakan mesin bor duduk. Pada penelitian ini mesin *drilling* yang digunakan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 2. Kemudian untuk geometri mata bor yang dipergunakan dalam pengujian adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Proses fabrikasi laminasi komposit dengan VARTM  
 Hasil cetakan sebagai material uji adalah ditunjukkan seperti '

Tabel 1. Panel benda uji hibrid komposit

Item	kode	Dimensi (mm)	Tebal
CBC	A1	20 x 20	2.06
BCB	A2	20 x 20	2.00
CBCBC	A3	20 x 20	2.04

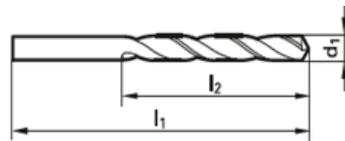


Gambar 2. Set-up alat penelitian

Spesifikasi mesin bor duduk adalah ditunjukkan seperti Tabel 2;

Tabel 2. Spesifikasi mesin bor duduk

<i>Manufacture</i>	WEST LAKE - CINA
<i>Model / Type</i>	ZHX - 13
<i>Power of motor</i>	180 W
<i>Spindle travel</i>	50 mm
<i>Worktable surface</i>	160 mm x 160 mm



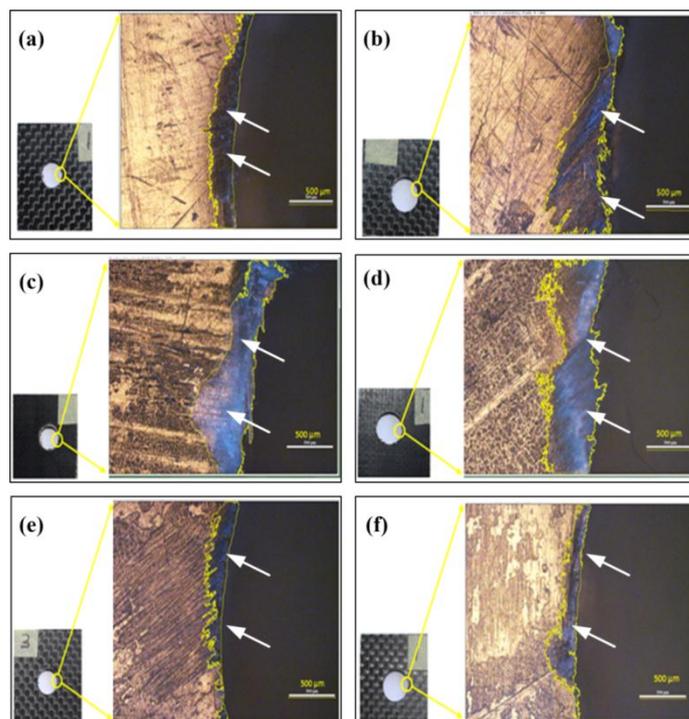
$d_1 \text{ } \varnothing$ (mm)	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)
8	117	75
10	133	87

Gambar 3. Geometri mata bor

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pengamatan cacat *drilling* hibrid komposit.

Gambar 4 menunjukkan cacat yang terjadi pada daerah pemotongan *drilling* untuk masing - masing variasi benda uji (A1, A2 dan A3). Cacat yang ditunjukkan adalah akibat dari pemotongan *drilling* dengan menggunakan mata pahat diameter 8 mm (Gambar 4a) dan 10 mm (gambar 4b) dengan perlakuan kering dan basah.



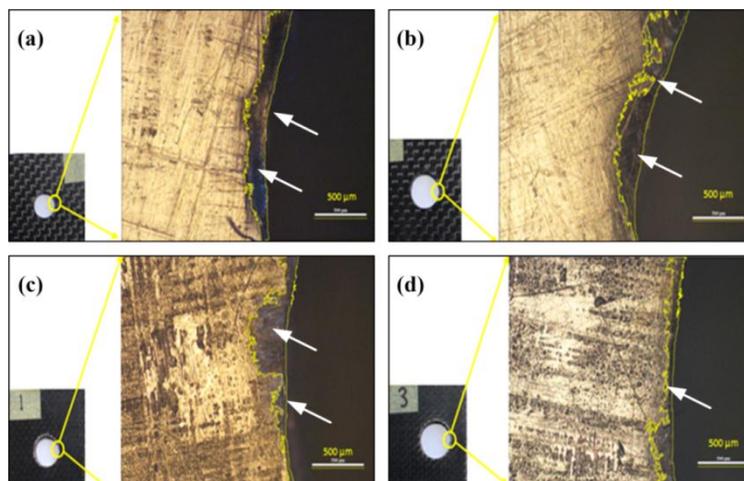
Gambar 4. Daerah cacat proses *drilling* kondisi kering (a) A1:8mm, (b). A1:10 mm (c) A2:8mm, (d) A2:10mm, (e) A3:8mm, (f) A3:10mm.

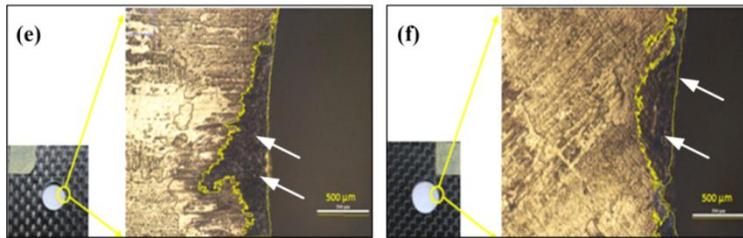
Pada Gambar 4(a-f) menunjukkan luas daerah cacat akibat perlakuan *drilling* dari material komposit dengan masing - masing variasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Benda uji

masing - masing untuk setiap variasi laminasi (A1, A2 dan A3) dilakukan proses *drilling* menggunakan pahat bor dengan ukuran 8 mm dan 10 mm pada kondisi kering. Hasil yang dapat ditunjukkan untuk proses *drill* dengan menggunakan mata bor 8 mm (geometri mata bor, lihat Gambar 3) pada kondisi tanpa pelumas menunjukkan luas daerah cacat seperti ditunjukkan dengan tanda panah pada Gambar 4(a, c, dan e). Adapun hasil pengamatan SEM dengan *low magnification* dapat dianalisa luas daerah cacat yang terbentuk masing - masing adalah  $0.423\text{mm}^2$ ,  $0.767\text{ mm}^2$ ,  $0.245\text{ mm}^2$ . Kemudian, pada proses *drilling* dengan menggunakan mata bor ukuran 10 mm, daerah cacat yang terjadi adalah seperti ditunjukkan oleh Gambar 4 (b, d, dan f). Luas daerah cacat yang timbul karena proses pemakanan kering masing-masing adalah  $0.652\text{m}^2$ ,  $0,864\text{ mm}^2$ ,  $0,300\text{ mm}^2$ . Proses pemotongan adalah sangat dipengaruhi oleh faktor - faktor pemotongan sebagaimana diutarakan oleh [10, 19]. Hasil eksperimen menunjukkan semakin besar diameter mata pahat maka cacat yang timbul akan semakin besar dimana hal ini disebabkan karena tekanan dan pemakanan yang terjadi semakin besar, sebagaimana juga di jelaskan dalam hasil penelitian yang dilakukan oleh [11] dan [12].

Disamping itu, dengan diameter mata pahat *drilling* yang semakin besar menimbulkan gesekan yang besar sehingga panas akibat gesekan yang terjadi lebih tinggi dari pada panas yang ditimbulkan oleh mata pahat yang berdiameter lebih kecil. Kondisi ini pada material komposit ditunjukkan dengan terjadinya perilaku delaminasi didaerah pemotongan. Kondisi delaminasi ini terjadi juga pada pengujian *drilling* untuk material komposit yang telah dilakukan oleh Wang, et.al [15, 17].

Dalam penelitian ini, dengan menggunakan material komposit hibridisasi laminasi serat karbon dan serat basalt, menunjukkan bahwa pada posisi serat karbon pada bagian terluar menunjukkan daerah pemotongan yang sempit dibandingkan oleh serat karbon berada pada lapisan bagian dalam (sebagai inti komposit). Hal ini disebabkan karena sifat material karbon lebih getas (*brittle*) dibandingkan dengan serat basalt (*ductile*). Dengan demikian, saat pemakanan gaya pemakanan yang dibutuhkan lebih kecil dibandingkan serat basalt. Berdasarkan dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa hibridisasi dengan laminasi serat basalt pada serat karbon meningkatkan *durability* material komposit terhadap perlakuan *drilling*. Disamping itu dibutuhkan pemberian lubang awal (*pilot hole*) sebelum proses berlanjut untuk pengeboran dengan diameter mata bor yang lebih besar [20].





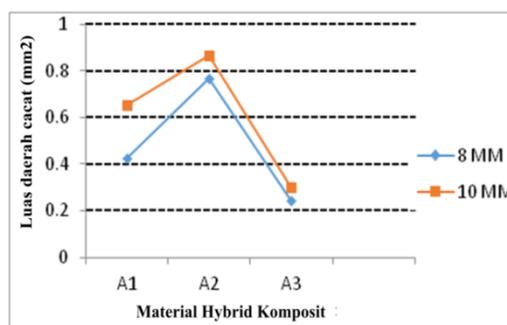
Gambar 5. Daerah cacat proses *drilling* kondisi basah (a) A1:8mm, (b). A1:10 mm (c) A2:8mm, (d) A2:10mm, (e) A3:8mm, (f) A3:10mm.

Gambar 5(a-f) adalah menunjukkan daerah cacat *drilling* dari material hibrid komposit epoxy laminasi serat karbon dan serat basalt pada kondisi basah (dengan pelumas) untuk diameter mata bor 8mm dan 10mm. Pelumasan dalam proses pemotongan memberikan dampak positif terhadap material dimana telah terjadi penurunan temperatur akibat gesekan. Temperatur pemotongan proses permesinan merupakan salah satu faktor yang berperan dalam menghasilkan suatu kualitas permukaan material hasil pemotongan. Selanjutnya, Gambar 5(b,d,f) menunjukkan luas daerah cacat pemotongan *drilling* yang terjadi pada kondisi basah untuk diameter mata bor 10mm. Luas daerah cacat yang terjadi masing-masing variasi laminasi hibrid komposit (A1, A2, A3) yaitu  $0,361 \text{ mm}^2$ ,  $0,203 \text{ mm}^2$ , dan  $0,376 \text{ mm}^2$ . Berdasarkan, hasil analisa dan pengamatan peneliti dapat dilihat dengan pemberian pelumasan dalam proses pemotongan dampak yang terjadi tidak terlalu signifikan terhadap cacat yang terbentuk. Akan tetapi, dengan menggunakan pahat yang memiliki diameter yang lebih besar tanpa pemberian *pilot hole* akan menimbulkan *impact* yang relatif besar pada material sehingga akan menimbulkan *fracture* pada material komposit terutama untuk laminasi dengan serat karbon tersusun pada bagian luar, karena serat karbon bersifat sangat getas (*brittle*).

Secara menyeluruh data nilai distribusi tegangan pada material komposit epoxy berpenguat *hybrid* anyaman serat karbon dan serat *basalt* pada permesinan *drilling* dengan variasi laminasi penyusun serat, diameter mata bor dan kondisi pemotongan ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut :

Tabel 3. nilai daerah cacat *drilling* material *hybrid* komposit

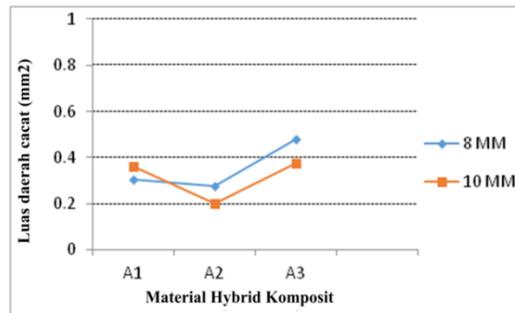
NO	Item	Kode	Dry ( $\text{mm}^2$ )		Wet ( $\text{mm}^2$ )	
			8 mm	10 mm	8 mm	10 mm
1.	CBC	A1	0,423	0,652	0,304	0,361
2.	BCB	A2	0,767	0,864	0,279	0,203
3.	CBCBC	A3	0,245	0,300	0,481	0,376



Gambar 6. Grafik hubungan variasi laminasi penguat material komposit dengan luas daerah cacat *drilling* pada *dry process* menggunakan diameter bor 8 mm dan 10 mm

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan antara variasi laminasi hibrid komposit dengan luas daerah cacat pada kondisi kering untuk masing - masing diameter pahat bor. Dari grafik dihasilkan bahwa secara keseluruhan pada proses *drilling* kering semakin besar

diameter mata potong luas daerah cacat semakin besar karena panas yang timbul akibat gesekan antara mata potong dengan benda kerja meningkat. Kemudian, dari Gambar 6 dapat diperhatikan bahwa untuk luasan cacat tertinggi adalah terjadi pada material A2 dimana serat basalt tersusun pada bagian luar (lihat Tabel 3). Kondisi ini disebabkan sifat dari material basalt lebih *ductile* dibandingkan dengan serat karbon. Sehingga energi yang dibutuhkan lebih besar, dan ketika mata pahat menyentuh serat karbon perambatan retak yang terjadi lebih cepat dibandingkan. Hal ini berdampak pada semakin lebarnya daerah cacat yang terjadi.



Gambar 7. Grafik hubungan variasi laminasi penguat material komposit dengan luas daerah cacat *drilling* pada *wet process* menggunakan diameter bor 8 mm dan 10 mm

Pada kondisi permesinan *wet process*, terjadi beberapa penurunan nilai distribusi daerah cacat *drilling*, karena faktor *coolant* pemotongan. Material komposit A3 memberikan nilai distribusi tegangan terbesar daripada material komposit A1 dan A2. Gaya *impact* awal pemotongan memberikan dampak awal pada material dalam kemampuan menerima tegangan luar yang dihasilkan dari proses permesinan. Susunan laminasi pada material komposit A3 lebih variatif, sehingga kelemahan pada serat karbon dapat tercover adanya serat basalt.

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pengolahan data penelitian dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan variasi pemakaian diameter mata bor 8 mm dan 10 mm, material masih mampu menerima gaya pemotongan dan distribusi tegangan yang diberikan selisih maksimal  $0,2 \text{ mm}^2$ .
2. Secara kesatuan karakteristik komposit akan memiliki sifat yang berbeda dari komponen penyusunnya. Dengan proses permesinan, komponen penyusun material komposit masih berdiri secara individu.
3. Kondisi pemotongan *wet process* akan menurunkan temperatur pemotongan dan memberikan dampak signifikan terhadap nilai distribusi tegangan yang terbentuk.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jin Zhang, Khunlavit Chaisombat, Shuai He, and Chun H Wang, 2012, Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures, *Materials & Design*, vol. 36, pp. 75-80.
- [2] Idg Ary Subagia, and Yonjig Kim, 2013, A study on flexural properties of carbon-basalt/epoxy hybrid composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 987-992.
- [3] Se Artemenko, and Yu A Kadykova, 2008, Hybrid composite materials, *Fibre chemistry*, vol. 40, no. 6, pp. 490-492.
- [4] Idg Ary Subagia, Yonjig Kim, Leonard D Tijing, Cheol Sang Kim, and Ho Kyong Shon, 2014, Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composites Part B: Engineering*, vol. 58, pp.

- 251-258.
- [5] F Sarasini, J Tirillò, L Ferrante, M Valente, T Valente, L Lampani, P Gaudenzi, S Cioffi, S Iannace, and L Sorrentino, 2014, Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt–carbon/epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, vol. 59, pp. 204-220.
  - [6] Tamás Deák, and Tibor Czigány, 2009, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison, *Textile Research Journal*, vol. 79, no. 7, pp. 645-651.
  - [7] Vivek Dhand, Garima Mittal, Kyong Yop Rhee, Soo-Jin Park, and David Hui, 2015, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, vol. 73, pp. 166-180.
  - [8] Roberto Teti, 2002, Machining of composite materials, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 611-634.
  - [9] Defu Liu, Yongjun Tang, and Wl Cong, 2012, A review of mechanical drilling for composite laminates, *Composite Structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265-1279.
  - [10] B Murthy, L Rodrigues, and Anjaiah Devineni, 2012, Process parameters optimization in gfrp drilling through integration of taguchi and response surface methodology, *Research Journal of Recent Sciences ISSN*, vol. 2277, pp. 2502.
  - [11] Navid Zarif Karimi, Hossein Heidary, Giangiacomo Minak, and Mehdi Ahmadi, 2013, Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates, *Composite Structures*, vol. 98, pp. 59-68.
  - [12] M Saleem, L Toubal, R Zitoune, and H Bougherara, 2013, Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 55, pp. 169-177.
  - [13] Amrinder Pal Singh, Manu Sharma, and Inderdeep Singh, 2013, A review of modeling and control during drilling of fiber reinforced plastic composites, *Composites Part B: Engineering*, vol. 47, pp. 118-125.
  - [14] Ozden Isbilir, and Elaheh Ghassemieh, 2013, Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites, *Composite Structures*, vol. 105, pp. 126-133.
  - [15] Xu Wang, Yan Li He, and Jing Yi Wang, 2013, A delamination factor prediction model for drilling of composite materials. pp. 41-45.
  - [16] Kv Krishna Sastry, V Seshagiri Rao, K Palanikumar, R Dhanalakshmi, and Abhishek Kuravi, 2014, Assessment of process parameters influencing delamination factor on the drilling of cfrc composite material with tin coated carbide tool, *Indian journal of science and technology*, vol. 7, no. 2, pp. 142-150.
  - [17] Nanya Li, Yingguang Li, Jing Zhou, Yongxi He, and Xiaozhong Hao, 2015, Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 97, pp. 11-17.
  - [18] Bin Luo, Yuan Li, Kaifu Zhang, Hui Cheng, and Shunuan Liu, 2016, Effect of workpiece stiffness on thrust force and delamination in drilling thin composite laminates, *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 5, pp. 617-625.
  - [19] Luís Miguel P Durão, João Manuel Rs Tavares, Victor Hugo C De Albuquerque, Jorge Filipe S Marques, and Oscar Ng Andrade, 2014, Drilling damage in composite material, *Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 3802-3819.
  - [20] Pierre Rahme, Yann Landon, Robert Piquet, Frederic Lachaud, and Pierre Lagarrigue, 2016, Drilling analytical model of composite material with pilot hole, *Mechanics & Industry*, vol. 17, no. 5, pp. 513.