

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Variasi konfigurasi lapisan (*layer configuration*) berpengaruh terhadap ketahanan *impact* material *hybrid composite* berbasis *epoxy*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi *fiberglass woven* yang dikombinasikan dengan *fiber carbon* memiliki ketahanan *impact* yang lebih baik dibandingkan konfigurasi *fiberglass* acak dengan *fiber carbon*. Hal ini disebabkan oleh susunan serat *woven* yang lebih teratur sehingga mampu mendistribusikan beban *impact* secara lebih merata dan meningkatkan kemampuan material dalam menahan pembebanan kejut.
2. Hasil uji *impact* Charpy menunjukkan bahwa variasi *fiberglass woven* dengan *fiber carbon* menghasilkan energi serap rata-rata sebesar 13,7 Joule, sedangkan variasi *fiberglass* acak dengan *fiber carbon* menghasilkan energi serap rata-rata sebesar 9,3 Joule. Dengan demikian, konfigurasi *fiberglass woven* dengan *fiber carbon* memiliki kemampuan penyerapan energi *impact* yang lebih tinggi. Hasil tersebut didukung oleh pengamatan SEM yang menunjukkan dominasi mekanisme *fiber pull-out*, *delaminasi*, dan *matrix cracking* pada variasi *woven*, sehingga energi *impact* dapat terdisipasi secara lebih efektif sebelum terjadi kegagalan material.
3. Mekanisme kerusakan pada kedua variasi *hybrid composite* meliputi *matrix cracking*, *delaminasi*, *fiber pull-out*, dan *fiber breakage*. Hasil SEM menunjukkan bahwa konfigurasi *fiberglass woven* dengan *fiber carbon* menghasilkan propagasi kerusakan yang lebih bertahap melalui mekanisme *fiber pull-out*, *matrix cracking*, *fiber breakage* dan *delaminasi* yang lebih efektif dalam mendisipasikan energi *impact*. Sebaliknya, konfigurasi *fiberglass* acak dengan *fiber carbon* menunjukkan pola kerusakan yang lebih tidak teratur akibat orientasi serat yang acak dengan hanya dominasi mekanisme *fiber pull-out* dan *delaminasi* yang menghasilkan kemampuan penyerapan energi *impact* lebih rendah. Perbedaan mekanisme kerusakan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi serat berpengaruh terhadap pola propagasi retak dan kemampuan material dalam menyerap energi *impact*.

5.2. Saran

1. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan konfigurasi lapisan *hybrid* berbasis fungsi gradien (*functionally graded hybrid composite*) yang lebih kompleks, seperti variasi distribusi bertahap (*gradual transition*) antara *fiberglass* dan *fiber carbon* pada arah ketebalan laminat. Pendekatan ini berpotensi menghasilkan mekanisme disipasi energi yang lebih optimal dibandingkan konfigurasi lapisan konvensional, khususnya untuk aplikasi struktur ringan yang membutuhkan kombinasi kekuatan dan ketahanan *impact* yang tinggi.
2. Penelitian lanjutan perlu mengkaji hubungan antara karakteristik mikrostruktur hasil SEM dengan parameter kerusakan numerik pada simulasi FEA, sehingga dapat dikembangkan model prediksi kegagalan yang lebih representatif terhadap perilaku aktual material *hybrid composite*. Pendekatan ini masih relatif terbatas diterapkan pada komposit *hybrid* berbasis *fiberglass–fiber carbon* dan berpotensi menjadi dasar pengembangan metode desain berbasis kerusakan (*damage-based design*).
3. Penelitian berikutnya dapat diarahkan pada analisis *impact* bertingkat (*multi-energy impact*) dan *damage tolerance* untuk mengevaluasi kemampuan struktur *hybrid composite* dalam mempertahankan integritasnya setelah mengalami tumbukan berulang. Kajian ini memiliki relevansi tinggi terhadap aplikasi pada struktur transportasi dan dirgantara, karena kerusakan awal yang tidak terlihat secara visual (*barely visible impact damage*) sering kali menjadi penyebab penurunan performa struktur selama masa operasi