JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Vol. 10, No. 2, Desember 2025, Hal. 17-26 p-ISSN 2548-737X
Terakreditasi "**Peringkat 3**" oleh Kemdiktisaintek, Nomor : 10/C/C3/DT.05.00/2025 e-ISSN 2548-8678
DOI: 10.31544/jtera.v10.i2.2025.17-26

Kajian Pengembangan Desain dan Material *Crash box* dengan Pendekatan Analisis Bibliometrik

Bayu Agung Wicaksono[1], Dewi Indra Anggraeni[2], Fuad Dwi Hanggara[3]
[1]Prodi Teknologi Otomotif, Jurusan Rekayasa dan Industri, Politeknik Negeri Tanah Laut
[2]Prodi Akutansi Perpajakan, Jurusan Komputer dan Bisnis, Politeknik Negeri Tanah Laut
Jl. A. Yani KM 05 Desa Panggung, Kec. Pelaihari, Kab. Tanah Laut, Kalimantan Selatan
[3]Prodi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang
Jl. Locari, Tlekung, Junrejo, Kota Batu, Jawa Timur
bayu.agung@politala.ac.id

Abstrak

Penelitian ini secara sistematis menganalisis tren dan perkembangan riset mengenai *crash box* dengan pendekatan bibliometrik. Melalui identifikasi pola publikasi, frekuensi topik, dan keterkaitan antar-topik dari 109 artikel ilmiah yang disaring dari basis data Google Scholar, studi ini memberikan gambaran komprehensif. Analisis menggunakan VOSviewer mengelompokkan riset *crash box* ke dalam fokus utama seperti *crashworthiness*, material dan struktur, optimasi desain, serta inovasi geometri. Tren menunjukkan pergeseran fokus dari pola deformasi dan penyerapan energi (2018–2020) menuju optimasi desain berbasis simulasi, struktur *lattice*, dan peningkatan *crashworthiness* (2021–2024). Selanjutnya, dilakukan kajian terhadap beberapa artikel yang memiliki nilai sitasi paling tinggi (besar sitasi lebih dari 100 kali). Hasil kajian terhadap artikel-artikel tersebut menunjukkan inovasi desain biomimetik (struktur tibia), struktur *Negative Poisson's Ratio* (NPR), dan desain origami (pola *diamond* dan *trapezoid*) pada *crash box*. Penggunaan material Aluminium/CFRP juga terbukti meningkatkan performa penyerapan energi. Hasil ini memetakan perkembangan *crash box* dan mengidentifikasi peluang riset untuk desain serta material yang lebih optimal.

Kata kunci: bibliometrik, *crash box,* pengembangan desain

Abstract

This research analyze trend and development of research on crash box by using bibliometric. By identify publication pattern, topic frequency and the topic relationship between 109 article from Google scholar, this research showed a comprehensive review. VOSviewer was used to analyze this research, by classifying crash box research topic to several main focuses, such as crasworthiness, material and structure, design optimization, and geometric inovation. The trend showed the shift of research focus, from deformation pattern and energy absorption (2018-2020), to design optimization using simulation, lattice structure, and crasworthiness enhancement (2021-2024). Furthermore, a review of several articles that have the highest citation value (more than 100 citations) was conducted. The results showed biomimetic design (tibia structure) inovation, Negative Poisson's Ratio (NPR) structure and origami design (diamond and trapezoid pattern) on crash box. Using Aluminium/CFRP has demonstrated an improvement in energy absorption capabilities. The findings of this research illustrate the advancements made in crash box performance and identify potential research avenues for further optimization of design and material selection.

Keywords: *bibliometric, crash box, design enhancement*

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya panjang jalan di Indonesia dan kebutuhan transportasi untuk mobilitas penduduk, terjadi peningkatan

© 2025 JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Politeknik Sukabumi

penggunaan kendaraan bermotor di Indonesia. Disadur dari data Badan Pusat Statistik, terjadi peningkatan kendaraan bermotor, khususnya mobil penumpang, yakni sebesar 23% selama rentang waktu 2018-2023 [1], [2]. Peningkatan jumlah kendaran tersebut, berpotensi dalam peningkatan jumlah kecelakaan kendaraan bermotor di Indonesia.

Dalam rangka meningkatkan keamanan berkendara, para produsen kendaraan bermotor, berinovasi dengan menciptakan berbagai jenis sistem keamanan, baik sistem keamanan aktif maupun pasif. Sistem keamanan aktif yang umumnya digunakan dalam kendaraan roda-4 adalah sistem kontrol traksi kendaraan (*traction control system*), sistem rem anti terkunci (*anti-lock brake system*) dan *airbag*. Sedangkan, contoh penggunaan sistem keamanan pasif adalah sabuk pengaman, penguatan pada struktur kerangka kendaraan, kolom kemudi yang hancur selama tabrakan (*collapsible steering column*) serta *crash box*.

Crash box bertugas untuk menyerap energi saat benturan terjadi, berfungsi mengurangi dampak kerusakan pada struktur utama mobil saat tabrakan. Lebih lanjut, penggunaan *crash box* pada kendaraan juga diharapkan dapat mengurangi cedera pada penumpang. Penelitian terkait *crash box* telah banyak dilakukan, terutama yang terkait dengan desain *crash box* dan jenis material yang digunakan. Modifikasi-modifikasi tersebut dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energinya.

Banyak penelitian telah dilakukan dengan memodifikasi desain crash box untuk meningkatkan kemampuan penyerapan energi. Halman [3] menyebutkan bahwa variasi posisi sambungan pada crash box bersegmentasi dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energi. Tawaf [4] juga mengungkapkan bahwa perubahan desain crash box, dalam bentuk variasi diameter, memiliki dampak signifikan terhadap pola deformasi dan kemampuan penyerapan energi. Dengan meningkatnya diameter, deformasi yang terjadi bertambah besar, sehingga energi yang diserap selama tabrakan juga meningkat. Rismanto [5] menyatakan bahwa penambahan lubang pada *crash box* dapat berfungsi sebagai titik awal pembentukan deformasi yang menghasilkan pola deformasi yang terkontrol dan mengurangi risiko *buckling* sehingga mampu meningkatkan efisiensi penyerapan energi pada *crash box*. Penggunaan struktur origami pada *crash box* juga mampu meningkatkan kemampuan penyerapan energi spesifik hingga 107% dan menurunkan gaya puncak awal hingga 68% [6], [7]

Selain itu, penggunaan material komposit seperti kombinasi Al/CFRP menunjukkan penurunan massa *crash box* hingga 35%, namun mampu meningkatkan penyerapan energi serta gaya hancur rata-rata secara signifikan [8]. Lebih lanjut, penggunaan material hibrid pada *crash box* (kombinasi logam dan komposit) mampu meningkatkan penyerapan energi hingga 2 kali lebih besar dibandingkan *crash box* tabung berbahan aluminium [9].

Secara keseluruhan, berbagai penelitian tersebut menekankan pentingnya inovasi dalam desain dan struktur *crash box* untuk meningkatkan kemampuannya dalam menyerap energi tabrakan. Pendekatan seperti variasi sambungan, penerapan pola origami, modifikasi dimensi geometris, dan penambahan fitur inisiator keruntuhan telah terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penyerapan energi *crash box*. Hal ini juga dapat meningkatkan keselamatan penumpang kendaraan.

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk memahami hubungan antara artikel-artikel yang berkaitan dengan desain dan penggunaan material crash box melalui pendekatan analisis bibliometrik. Studi ini menggunakan VOSviewer dan basis data Google Scholar yang diperoleh dengan software Publish or Perish untuk menganalisis korelasi antara artikel-artikel tersebut. Setelah analisis korelasi, dilakukan ulasan mendalam terhadap lima artikel dengan nilai sitasi tertinggi (lebih dari 100 kali disitasi). Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menjadi panduan bagi para peneliti dalam bidang crash box untuk mengidentifikasi peluang riset dan pengembangan yang lebih optimal.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui analisis bibliometrik. Dalam riset ini, teknik analisis bibliometrik yang diaplikasikan adalah *science mapping*. *Science mapping* lebih menitikberatkan pada keterkaitan antara hasil-hasil penelitian dari berbagai peneliti dalam bidang yang serupa [10]. Penggunaan metode bibliometrik pada penelitian ini bertujuan agar didapatkan perkembangan penelitian yang terkait dengan pengembangan crash box.

Langkah awal dalam pelaksanaan penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan database mengenai penelitian terkait *crash box* serta material yang digunakan. Pengumpulan informasi penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan aplikasi *Publish or Perish*. Sumber data diambil dari *Google Scholar* dengan rentang waktu antara tahun 2014 hingga 2024. Kata kunci yang digunakan dalam aplikasi *Publish or Perish* adalah "*crash box, design, material*". Selanjutnya, hasil dari pencarian ini diseleksi secara hati-hati agar artikel-artikel yang dipilih benar-benar sesuai dengan kata kunci yang telah ditentukan, yakni berfokus hanya pada artikel yang membahas tentang pengembangan desain dan

penggunaan material untuk *crash box*. Selain itu, alur penelitian ini dijelaskan lebih lanjut pada gambar 1.



Gambar 1. Alur pelaksanaan penelitian

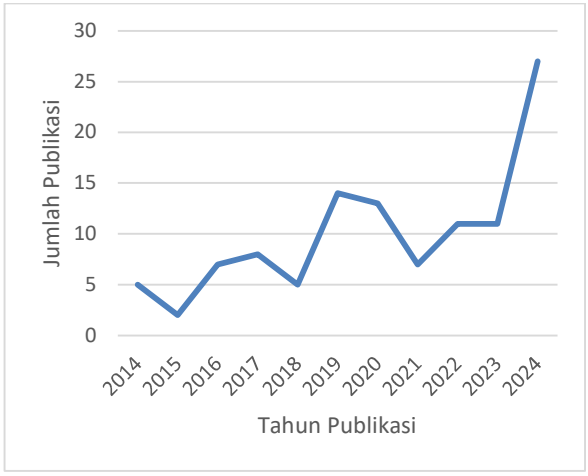
Setelah dilakukan pencarian dan penyeleksian artikel pada database *Google Scholar*, didapatkan 109 artikel yang dianggap memenuhi kriteria dalam penelitian ini, yakni pengembangan desain dan penggunaan material *crash box*. Nantinya, ke-109 artikel tersebut akan dilakukan analisis bibliometrik. Data dari 109 artikel tersebut nanti akan disimpan dalam bentuk .csv dan .ris. Format .csv digunakan untuk mengetahui tren publikasi dari tahun 2014-2024. Sedangkan, format .ris digunakan untuk melakukan *science mapping* melalui *software* VOSViewer untuk mengetahui pemetaan keterkaitan antar-topik, tren topik penelitian dari tahun ke tahun dan frekuensi penelitian berdasarkan kata kunci yang diinginkan. Lebih lanjut, ke-109 artikel tersebut tidak dikaji secara mendalam pada penelitian ini, namun hanya sebagai *input* untuk *software* VOSviewer.

Selanjutnya, untuk mengetahui pengembangan desain dan material *crash box* beserta pola penyerapan energinya, dari 109 artikel tersebut, diambil 5 artikel yang memiliki sitasi paling tinggi (lebih dari 100 kali disitasi). 5 artikel tersebut nantinya akan diinterpretasi untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Tren publikasi, tren penelitian dan frekuensi penelitian

Penelitian terkait dengan desain dan penggunaan material *crash box* telah banyak dilakukan. Gambar 2 menunjukkan tren publikasi yang terkait dengan *crash box, design, material*.



Gambar 2. Tren publikasi jurnal yang terkait dengan *crash box design*

Jika dilihat dari gambar 2, terlihat bahwa jumlah publikasi yang terkait dengan *crash box, design, material* cukup fluktuatif. Jumlah publikasi yang menurun secara signifikan terjadi pada tahun 2021. Selanjutnya, pada tahun 2022 sampai 2024, jumlah penelitian meningkat dengan pesat.

Selanjutnya, dari 109 publikasi tersebut, terdistribusi di beberapa jurnal dan prosiding. Tabel 1 menyajikan data penyebaran penerbitan naskah penelitian di beberapa jurnal.

Tabel 1. Jumlah publikasi naskah penelitian di beberapa jurnal

No	Jurnal	Jumlah
1	AIP Conference Proceedings	9
2	International Journal of Crashworthiness	6
3	International Conference	6
4	SAE Technical Papers	5
5	Structural and Multidisciplinary Optimization	5
6	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Automobile Engineering	5
7	Materials Today: Proceedings	4
8	Journal of Physics: Conference Series	4
9	International Journal of Vehicle Structures & Systems	4
10	Thin-Walled Structures	3
11	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	3
12	Materials Testing	3
13	Composite Structures	2
14	Eastern-European Journal of Enterprise Technologies	2

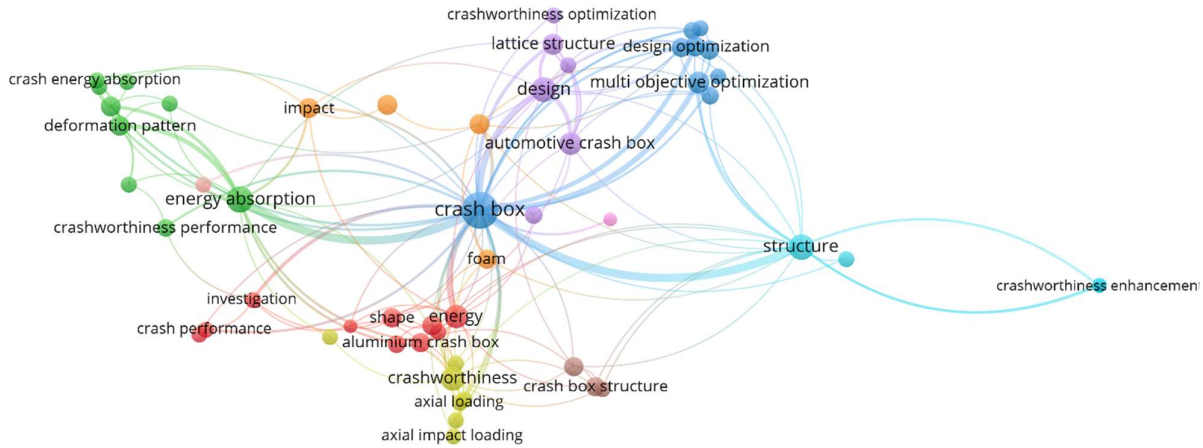
No	Jurnal	Jumlah
15	International Journal of Mechanical Sciences	2
16	International Journal of Mechanics Sciences	2
17	Journal of Energy, Mechanical, Material and Manufacturing Engineering	2
18	Latin American Journal of Solids and Structures	2
19	Mechanics of Advanced Materials and Structures	2
20	MM Science Journal	2
21	Advanced Materials Research	1
22	Advances in Mechanical Engineering	1
23	Applied Mechanics and Materials	1
24	Applied Soft Computing	1
25	Asia-Pacific Journal of Science and Technology	1
26	Composites Part B Engineering	1
27	Composites Part C Open Access	1
28	DINAMIS	1
29	Emerging Materials Research	1
30	Engineering Computations	1
31	European Journal of Mechanics-A/Solids	1
32	International Journal of Automotive and Mechanical Engineering	1
33	International Journal of Automotive Technology	1
34	International Journal of Computer Science Engineering and Applications	1
35	International Journal of Integrated Engineering	1
36	International Journal of Management, Technology and Engineering	1
37	International Journal on Interactive Design and Manufacturing	1
38	Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy	1
39	Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences	1
40	Journal of Applied Mechanics	1
41	Journal of Automobile Engineering and Applications	1
42	Journal of Composites Science	1
43	Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	1
44	Journal of Engineering and Applied Sciences	1
45	Journal of Interdisciplinary Cycle Research	1
46	Journal of Mechanical Engineering and Sciences	1
47	Jurnal Teknologi	1
48	Material Design & Processing Communications	1
49	Mechanics Based Design of Structures and Machines	1
50	PAMM	1
51	Polymer Composites	1
52	Procedia Engineering	1
53	Proceedings of the Multimedia University Engineering Conference	1
54	Sakarya University Journal of Science	1
55	Simetrikal: Journal of Engineering and Technology	1
56	Structures	1
57	Techno-Societal 2018	1

Dari tabel 1 didapatkan bahwa terdapat 3 lokasi publikasi naskah penelitian "*crash box, design, material"*, yakni AIP *Conference Proceedings* sebanyak 9 publikasi, *International Journal of Crashworthiness* sebanyak 6 publikasi, dan *International Conferences* sebanyak 6 publikasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa penelitian terkait dengan *crash box design* sering disampaikan dalam berbagai forum konferensi, seperti konferensi internasional yang terafiliasi dengan AIP, *international conference on advances in mechanical and robotics engineering* yang diadakan tahun 2014, *international design engineering technical conferences and computer and information in engineering conferences* yang diadakan tahun 2016, *international conference on ideas, impact and innovation in mechanical engineering* yang diadakan tahun 2017, *international conference integrity-reliability-failures* yang diadakan tahun 2018, *international conference on electric vehicular technology* yang diadakan tahun 2019 dan *international conference on telecommunication systems*, *services and applications* yang diadakan tahun 2023. Selain diterbitkan di prosiding, naskah penelitian terkait *crash box design* juga diterbitkan di jurnal international, yakni *International Journal of Crashworthiness*. Jurnal tersebut terindeks *scopus*

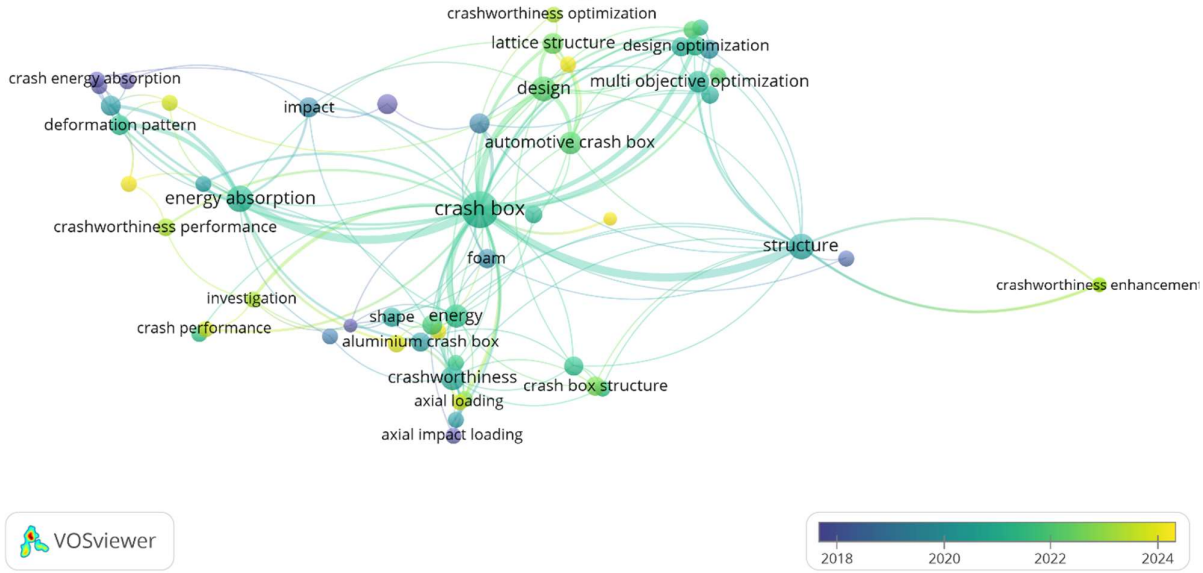
Q2 untuk kategori *industrial and manufacturing engineering* dan *mechanical engineering*, serta terindeks *scopus* Q3 untuk kategori *transportation*.

Tabel 1 juga menunjukkan bahwa topik penelitian *crash box design* cukup berkaitan erat dengan pengembangan material komposit. Hal tersebut ditunjukkan bahwa terdapat beberapa naskah penelitian yang diterbitkan di jurnal *Composite Structures* (terindeks *scopus* Q1), *Composites Part B Engineering* (terindeks *scopus* Q1), *Composites Part C Open Access* (terindeks *scopus* Q1), *Journal of Composites Science* (terindeks *scopus* Q2), dan *Polymer Composites* (terindeks *scopus* Q2 untuk kategori *ceramics and composites*).

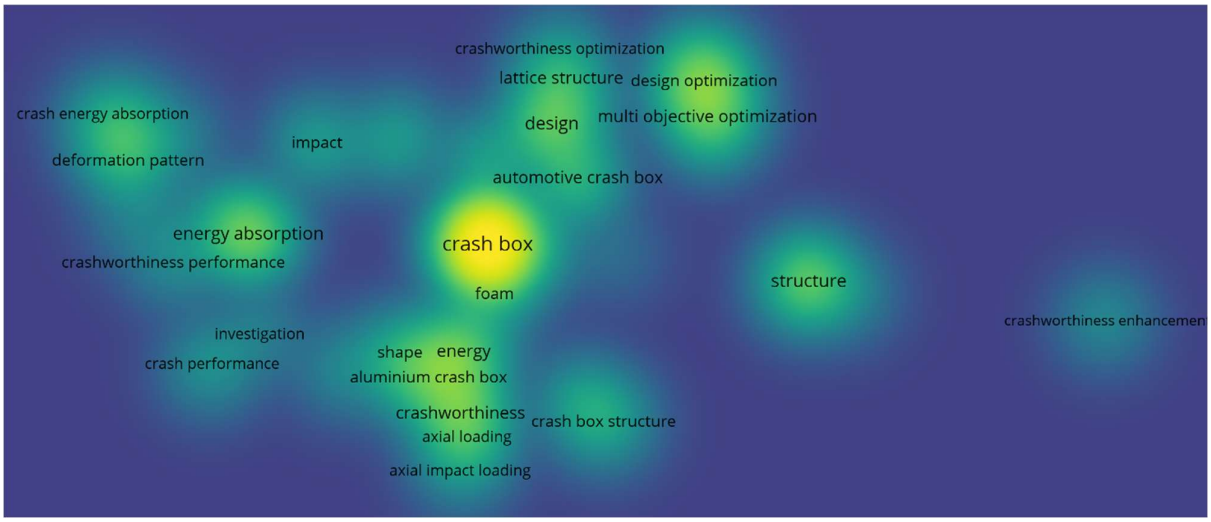
Analisis berikutnya adalah mencari keterkaitan antara satu naskah publikasi dengan naskah yang lain dengan basis kata kunci, dengan menggunakan *VOSViewer*. Gambar 3 menunjukkan keterkaitan topik penelitian, gambar 4 menunjukkan tren topik penelitian dari tahun ke tahun dan gambar 5 menunjukkan intensitas penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 3. Tren penelitian *crash box*



Gambar 4. Tren penelitian *crash box* dari tahun ke tahun



Gambar 5. Frekuensi penelitian yang telah dilakukan

Gambar 3 menunjukkan bahwa *crash box* adalah topik utama yang paling banyak diteliti. Dari topik tersebut, kemudian muncul topik-topik lain yang mendukung topik utama tersebut, yang ditunjukkan dari klaster-klaster yang terkait dengan topik utama. Klaster hijau berfokus pada mampu tabrak (*crashworthiness*) dan kemampuan penyerapan energi *crash box*. Pada klaster tersebut, penelitian terfokus pada bagaimana agar *crash box* dapat menyerap energi secara optimal. Klaster merah berfokus pada material dan struktur dari *crash box*. Fokus penelitian pada klaster tersebut adalah pemilihan bahan dan desain *crash box* yang mampu memingkatkan kemampuan penyerapan energi *crash box*. Klaster biru berfokus pada optimasi desain dan struktur *crash box*. Klaster tersebut berfokus pada optimasi desain dari bentuk dan struktur *crash box* agar *crash box* mampu menyerap energi dengan optimal. Klaster ungu berfokus pada pengembangan desain dan geometri *crash box*. Fokus penelitian dari klaster ini adalah pengembangan desain *crash box* seperti penggunaan struktur *lattice* pada *crash box*, untuk meningkatkan efisiensi penyerapan energi tanpa menambah massa *crash box*. Klaster terakhir, yakni klaster ungu berfokus pada performa dari *crash box*. Klaster ini berfokus pada penggunaan studi eksperimental ataupun simulasi (numerikal) untuk memahami dampak tabrakan dari berbagai bentuk dan desain *crash box*.

Gambar 4 menunjukkan tren penelitian *crash box* dari tahun ke tahun. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa di tahun-tahun awal, yakni tahun 2018-2020, penelitian hanya berfokus pada aspek penyerapan energi tabrakan (*crash energy absorption*), pola deformasi (*deformation pattern*) dan *impact*. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada tahun 2018-2020, penelitian yang dilakukan mayoritas membahas tentang hubungan antara pola deformasi *crash box* dengan kemampuan penyerapan energi tabrakan pada *crash box*. Selanjutnya, pada tahun 2021-2024, muncul kata kunci baru, yakni optimasi mampu tabrak *(crashworthiness optimization*), optimasi desain (*design optimization*), struktur *lattice* (*lattice structure*) dan peningkatan mampu tabrak *(crashworthiness enhancement*). Hal tersebut menunjukkan bahwa pada tahun 2021-2024 penelitian *crash box* telah bergeser ke arah optimasi desain *crash box* yang telah ada untuk meningkatkan mampu tabrak (*crashworthiness enhancement*) pada *crash box*.

Gambar 5 menunjukkan intensitas penelitian berdasarkan kata kunci yang ada. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa optimasi desain berbasis simulasi dan struktur *lattice* merupakan arah penelitian yang saat ini sedang berkembang. Lebih lanjut, topik peningkatan kemampuan tabrak (*crashworthiness enhancement*) dan *crash box structure*, memiliki potensi sebagai topik yang diteliti. Hal tersebut disebabkan karena dua topik tersebut masih jauh dari topik utama penelitian, yakni *crash box*.

b. Pengembangan desain *crash box*

Setelah dilakukan analisis terhadap tren publikasi, tren serta frekuensi topik penelitian pada *crash box*, selanjutnya dilakukan interpretasi hasil penelitian yang terkait dengan pengembangan desain *crash box*. 5 artikel yang paling banyak disitasi, disajikan di tabel 2.

Tabel 2. Artikel yang paling banyak disitasi

No	Judul	Tahun	Jumlah Sitasi
1	*Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure*	2018	210

2	*Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application*	2014	166
3	*Dynamic axial crushing of origami crash boxes*	2016	151
4	*Design optimization of a novel NPR crash box based on multi-objective genetic algorithm*	2016	119
5	*Crashworthiness design for trapezoid origami crash boxes*	2017	119

Adapun hasil penelitian dari tabel 2 disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Kajian hasil penelitian terhadap artikel yang paling banyak disitasi

No	Judul	Hasil Penelitian
1	*Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure* [11]	a. Penelitian ini mengembangkan desain *crash box* dengan struktur luar berbentuk cembung dan pengisi yang mengadaptasi karakteristik struktur tulang tibia manusia. Struktur pengisi berupa material yang memiliki *negative poisson ratio* (NPR). b. Material struktur luar berupa baja dengan ketebalan 1,2 mm. Sedangkan, material pengisi berupa *aluminium alloy* dengan ketebalan yang bervariasi, yakni 0,6 mm untuk bagian depan, 0,9 mm untuk bagian tengah dan 1,2 mm untuk bagian belakang. c. Struktur pengisi di uji coba melalui simulasi. Selanjutnya dilakukan optimasi desain pada struktur pengisi dengan menggunakan algoritma AMGA (*archive-based micro genetic algorithm*) dan NSGA-II (*non-dominated sorting genetic algorithm* II). d. Hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur *crash box* yang dioptimasi dengan menggunakan NSGA-II lebih efektif dalam meningkatkan karakteristik penyerapan energi dan mampu tabrak (*crashworthiness*).
2	*Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application* [12]	a. Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan material komposit sebagai bahan dasar *crash box*. Bahan tersebut berupa batang *hollow* aluminium 6063 yang diperkuat dengan komposit *carbon fibre reinforced polymer.* Lebih lanjut, penelitian dilakukan secara eksperimental. b. Peningkatan ketebalan CFRP meningkatkan mampu tabrak (*crashworthiness*) *crash box*. Namun, semakin bertambah tebal, massa *crash box* semakin meningkat.
3	*Dynamic axial crushing of origami crash boxes* [13]	a. Penelitian ini mengembangkan desain *crash box* berbasis origami. Lebih lanjut, penelitian ini

No	Judul	Hasil Penelitian
		dilakukan secara eksperimental. b. *Crash box* ini menggunakan bahan lembaran baja karbon rendah (*mild steel flat sheet*). Proses pembuatan diawali dengan memasukkan bahan ke dalam cetakan. Selanjutnya dilakukan pengelasan menggunakan las titik (*spot welding*) untuk menghubungkan dua bagian origami agar tidak terpisah selama menerima tumbukan. Kemudian, dilakukan perlakuan panas (pada suhu 800ºC) untuk mengurangi tegangan residu yang disebabkan oleh proses *stamping* dan pengelasan. c. Terdapat 3 model lipatan pada origami *crashbox*, yakni: model *diamond*, model *local buckling* dan model *symmetric.* Model *diamond* adalah model paling baik dalam menyerap energi, sedangkan model *symmetric* adalah model paling buruk dalam menyerap energi . d. Bentuk origami lebih efektif dalam menyerap energi, dibandingkan *crash box* berbentuk persegi. Namun, ketidaksempurnaan geometri pada origami *crash box* sangat mempengaruhi model lipatan yang terjadi pada origami *crash box*.
4	*Design optimization of a novel NPR crash box based on multi-objective genetic algorithm* [14]	a. Penelitian ini dilakukan dengan mengembangkan *crash box* dengan menggunakan struktur pengisi *negative poisson's ratio* (NPR) pada bentuk *crash box* tradisional. Desain di uji coba dengan simulasi elemen hingga non-eksplisit. Selanjutnya, dari hasil simulasi, dilakukan optimasi desain menggunakan NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algortihm-II*) agar didapatkan bentuk yang optimal, dengan tetap mempertimbangkan nilai penyerapan energi spesifik (SEA). b. Bagian luar *crash box* terbuat dari baja SAPH440, sedangkan pengisi NPR terbuat dari aluminium. c. *Crash box* tradisional dengan pengisi NPR terbukti lebih baik dalam mampu tabrak (*crashworthiness*) dan efisiensi penyerapan energi dibandingkan dengan *crash box* tradisional dengan pengisi busa aluminium (*aluminium foam*).
5	*Crashworthiness design for trapezoid origami crash boxes* [15]	a. Penelitian ini merupakan pengembangan dari origami *crash box*.

No	Judul	Hasil Penelitian
		b. Pola origami yang digunakan berbentuk trapesium untuk mengontrol pola deformasi yang terbentuk akibat *crash box* menerima beban. Bentuk *crash box* tersebut di uji coba dengan simulasi, yang selanjutnya dilakukan optimasi desain. c. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga. Material yang digunakan adalah baja Q235. d. Model *trapezoid* origami *crash box* memiliki kemampuan penyerapan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan model *diamond* origami *crash box*.

Dari kelima artikel dengan sitasi tertinggi yang telah dikaji di atas, terlihat adanya beragam pendekatan inovatif yang berfokus pada peningkatan kemampuan penyerapan energi dan mampu tabrak (*crashworthiness*) *crash box*. Sebagian besar penelitian mengadalkan simulasi berbasis metode elemen hingga untuk menguji dan mengoptimasi desain, meskipun beberapa penelitian [12], [13] menggunakan metode pengujian eksperimental untuk melakukan validasi langsung terhadap desain yang diajukan.

Terdapat tren eksplorasi struktur baru, seperti biomimetik dan origami yang bertujuan meniru efisiensi struktur alami atau memanfaatkan pola lipatan untuk mengontrol deformasi yang terjadi. Beberapa peneliti secara spesifik mengeksplorasi struktur NPR [11], [14], menunjukkan kesesuaian bahwa struktur dengan bentuk ini memiliki potensi besar dalam meningkatkan kinerja *crash box* walaupun memiliki massa yang lebih rendah. Sementara itu, penelitian terkait dengan struktur origami [13], [15] menunjukkan perubahan bentuk dasar origami, dari pola *diamond* ke bentuk yang lebih kompleks (*trapezoid*) untuk meningkatkan kemampuan penyerapan energi *crash box*. Proses optimasi desain dengan menggunakan metode NSGA-II menjadi pendekatan umum untuk menyeimbangkan berbagai parameter kinerja seperti kemampuan penyerapan energi spesifik (SEA) dan *peak crushing force* (PCF).

Lima artikel yang telah dikaji secara mendalam yang disajikan pada tabel 3, tidak hanya menunjukkan berbagai solusi teknis, tetapi juga menggaris-bawahi kompleksitas dalam desain *crash box* yang optimal, yang seringkali melibatkan pertimbangan antara efisiensi penyerapan energi, kekuatan struktural, massa, dan pola deformasi yang terkontrol. Kemampuan untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan parameter desain kunci menjadi krusial dalam semua pendekatan ini.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis perkembangan riset *crash box* dengan pendekatan bibliometrik yang mencakup tren publikasi, frekuensi topik penelitian dan keterkaitan antar-topik, serta mendalami inovasi desain dan material dari artikel-artikel yang paling banyak disitasi. Dari analisis bibliometrik terhadap 109 artikel, dapat disimpulkan bahwa penelitian *crash box* terbagi dalam beberapa fokus utama, yaitu mampu tabrak (*crashworthiness*), material dan struktur, optimasi desain, serta inovasi geometri. Tren penelitian juga menunjukkan pergeseran fokus penelitian. Pada tahun 2018-2020, fokus topik penelitian adalah pola deformasi dan mekanisme penyerapan energi. Sedangkan pada tahun 2021-2024, fokus topik penelitian beralih ke optimasi desain berbasis simulasi, struktur *lattice* dan peningkatan mampu tabrak (*crashworthiness*) *crash box*. Topik yang berkaitan dengan peningkatan mampu tabrak (*crashworthiness enhnancement*) dan struktur *crash box* juga menunjukkan potensi besar untuk penelitian lebih lanjut.

Kajian mendalam terhadap artikel yang telah disitasi lebih dari 100 kali (5 artikel) memperkaya pemahaman tentang berbagai pendekatan inovatif dalam pengembangan desain dan material *crash box*, yakni penggunaan struktur biomimetik yang terinspirasi dari struktur tulang tibia, struktur NPR (*Negative Poisson Ratio*), desain origami dan penggunaan material komposit. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan gambaran mengenai perkembangan riset *crash box*, menyoroti inovasi dalam desain *crash box* (struktur biomimetik, NPR dan origami) serta penggunaan material *crash box* (Al/CFRP, baja SAPH440, aluminium) yang mampu meningkatkan penyerapan energi dan efisiensi penyerapan energi pada *crash box* secara signifikan. Temuan ini juga menggarisbawahi pentingnya

optimasi berbasis simulasi dan struktur *lattice* sebagai arah penelitian yang menjanjikan untuk pengembangan *crash box* yang lebih optimal di masa depan.

Dari hasil kajian mendalam terhadap 5 artikel yang disitasi paling banyak, perlu dilakukan beberapa hal, yakni:

a. Diperlukan validasi eksperimental untuk desain-desain inovatif, seperti struktur *lattice* atau biomimetik, terutama pada kondisi tumbukan yang lebih realistis, termasuk tumbukan miring dengan kecepatan yang bervariasi.
b. Diperlukan eksplorasi teknik fabrikasi lanjutan, seperti *additive manufacturing*, untuk memproduksi desain yang kompleks. Selain itu, penelitian harus fokus pada penggunaan material yang lebih ramah lingkungan atau dapat di daur ulang.
c. Diperlukan studi lebih lanjut mengenai material hibrida (kombinasi logam dengan komposit) untuk lebih memahami interaksi antar material secara lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Tanah Laut atas beragam fasilitas yang telah diberikan kepada penulis selama proses penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

[1] Badan Pusat Statistik, "Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Provinsi dan Jenis Kendaraan (unit), 2018," 2021.

[2] Badan Pusat Statistik, "Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Provinsi dan Jenis Kendaraan (unit), 2023," 2024. Accessed: Sep. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTlU1bVNFOTVVbmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-provinsi-dan-jenis-kendaraan--unit---2023.html?year=2023

[3] Halman, "Multi-Segment Crash Box Energy Absorption Ability Using Computer Simulation," *Jurnal Teknologi MEDIA PERSPEKTIF*, vol. 12, no. 2, pp. 60–70, 2020, [Online]. Available: http://e-journal.polnes.ac.id/index.php/mediaperspektif/index

[4] N. Tawaf and Asroni, "Analisa Deformasi Crash Box dengan Variasi Diameter dengan Simulasi Software Ansys 14.5," *TURBO*, vol. 2, pp. 6–14.

[5] M. Rismanto, "Analisis Pengaruh Lubang Terhadap Pola Deformasi dan Penyerapan Energi pada Multi-Cell Hexagonal Crash Box Dengan Simulasi Komputer," Universitas Brawijaya, 2020.

[6] A. Ciampaglia, D. Fiumarella, C. Boursier Niutta, R. Ciardiello, and G. Belingardi, "Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis and numerical optimization," *Compos Struct*, vol. 256, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113093.

[7] L. Yuan, H. Shi, J. Ma, and Z. You, "Quasi-Static Impact of Origami Crash Boxes with Various Profiles," *Thin-Walled Structures*, vol. 141, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.028.

[8] Q. Ma, Y. Zha, B. Dong, and X. Gan, "Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box," *Polym Compos*, vol. 41, no. 10, pp. 4202–4220, Oct. 2020, doi: 10.1002/pc.25705.

[9] D. H. Wakhidah, M. A. Choiron, Y. S. Irawan, and A. Purnowidodo, "Energy absorption and deformation pattern of circular hybrid crash box subjected to frontal load," *MM Science Journal*, vol. 2024-February, pp. 7222–7229, Feb. 2024, doi: 10.17973/MMSJ.2024_02_2023094.

[10] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 133, pp. 285–296, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

[11] C. Y. Wang, Y. Li, W. Z. Zhao, S. C. Zou, G. Zhou, and Y. L. Wang, "Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure," *Int J Mech Sci*, vol. 138–139, pp. 489–501, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.01.032.

[12] H. C. Kim, D. K. Shin, J. J. Lee, and J. B. Kwon, "Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application," *Compos Struct*, vol. 112, no. 1, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.01.042.

[13] C. Zhou, B. Wang, J. Ma, and Z. You, "Dynamic axial crushing of origami crash boxes," *Int J Mech Sci*, vol. 118, pp. 1–12, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.001.

[14] G. Zhou, Z. D. Ma, G. Li, A. Cheng, L. Duan, and W. Zhao, "Design optimization of a novel NPR crash box based on multi-objective genetic algorithm," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 54, no. 3, pp. 673–684, Sep. 2016, doi: 10.1007/s00158-016-1452-z.

[15] C. Zhou, Y. Zhou, and B. Wang, "Crashworthiness design for trapezoid origami crash boxes," *Thin-Walled Structures*, vol. 117, pp. 257–267, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.03.022.