

Review Artikel: Inovasi Keramik berbasis Organosilikon: *Polymer-Derived Ceramics* (PDCs)

Article Review: *Organosilicon-based Ceramic Innovation: Polymer-Derived Ceramics* (PDCs)

Afridha Cita Savitri¹, Laely Septiya Wati², Nanda³, Navila Nurliani⁴, Maya Erliza Anggraeni⁵, Marvin Horale Pasaribu⁶

^{1,2,3,4,5}Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Palangka Raya, Palangka Raya 73111, Indonesia

⁶Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya, Palangka Raya 73111, Indonesia

¹afridha.cita@gmail.com, ²laelyseptimawati@gmail.com, ³ndan4565@gmail.com, ⁴navilanurliani.26.2003@gmail.com, ⁵mayaerliza@chem.upr.ac.id,

⁶marvin.pasaribu@mipa.upr.ac.id

Format Kutipan: Savitri, A.C., Wati, L.S., Nanda., Nurliani, N., Anggraeni, M.A., & Pasaribu, M.H. (2024). Review Artikel: Inovasi Keramik berbasis Organosilikon: Polymer-Derived Ceramics (PDCs). *Nusantara Journal of Science and Technology (NU-JST)*, 1(1), hal. 16-30
<https://doi.org/10.333/nujst.v1n1.xxx>

RIWAYAT ARTIKEL

Dikirim: 17 Januari 2024
Revisi Akhir: 20 Maret 2024
Diterbitkan: 15 Mei 2024
Tersedia Daring Sejak: 15 Mei 2024

KATA KUNCI

PDCs
Polimer
Organosilikon
Aplikasi
Transformasi

KEYWORDS

PDCs
Polymers
Organosilicon
Applications
Transformations

ABSTRAK

Inovasi dan metode modern dalam produksi keramik, sebagai peralihan dari metode konvensional/tradisional, diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi. Salah satu inovasi dalam dunia industri keramik adalah dengan teknologi keramik turunan polimer (PDCs) dengan pemanfaatan senyawa organologam yaitu organosilikon. PDCs merupakan keramik yang berasal dari prekursor polimer prakematik organosilikon, yang pada umumnya dibagi menjadi polysiloxane, polycarbosiloxane, polycarbosilane, polysilycarbodiimides, polysilazane, polyborosilazanes, polyborosilanes, dan polyborosiloxanes. Transformasi polimer organosilikon menjadi keramik dilakukan melalui empat tahap yaitu shaping, cross-linking, pyrolysis, dan ceramization. PDCs memiliki sifat tahan pada suhu tinggi, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi di lingkungan yang ekstrim. Bentuk dari pengaplikasian PDCs adalah sebagai semikonduktor, sensor, pelapisan-membran, dan serat.

ABSTRACT

Innovation and modern methods in ceramic production, as a transition from conventional/traditional methods, are needed to improve production efficiency and quality. One innovation in the ceramic industry is the polymer-derived ceramic (PDC) technology with the utilization of organosilicon compounds. PDCs are ceramics derived from preceramic organosilicon polymer precursors, which are generally divided into polysiloxane, polycarbosiloxane, polycarbosilane, polysilycarbodiimides, polysilazane, polyborosilazanes, polyborosilanes, and polyborosiloxanes. The transformation of organosilicon polymers into ceramics is carried out through four stages: shaping, cross-linking, pyrolysis, and ceramization. PDCs have high-temperature resistance properties, making them suitable for various applications in extreme environments. The forms of PDC applications are as semiconductors, sensors, coating/membranes, and fibers.

Artikel ini dapat diakses secara terbuka (*open access*) di bawah lisensi CC-BY-SA



PENDAHULUAN

Perkembangan keramik di Indonesia dapat ditelusuri dari masa prasejarah hingga saat ini. Produksi keramik tradisional telah berkembang di masyarakat Indonesia sejak lama, terbukti dengan masih bertahannya tradisi kerajinan tradisional yang tersebar di berbagai wilayah nusantara. Dalam produksi keramik tradisional, terdapat beberapa teknik yang umum digunakan, yaitu teknik coil, teknik tatap batu/pijat jari, teknik slab, teknik putar, teknik cetak, dan teknik cetak pres (Hennicke & Hesse, 1991). Keramik tradisional umumnya dibuat dengan menggunakan bahan alam, seperti tanah liat, kuarsa, dan kaolin. Keramik tradisional memiliki sifat yang rapuh dan mudah pecah, namun tahan terhadap suhu tinggi (Dongoran et al., 2021). Sementara itu, keramik modern dibuat dengan menggunakan bahan sintetis atau campuran bahan alam. Keramik modern memiliki sifat yang lebih kuat dan tahan terhadap suhu tinggi dibandingkan dengan keramik tradisional (Husain et al., 2016).

Industri keramik di luar negeri, seperti di China, merupakan salah satu industri keramik terbesar di dunia. China memproduksi keramik sekitar 7,31 miliar m² pada tahun 2022, atau menguasai 45,7% dari total produksi dunia. Keramik banyak digunakan karena memiliki daya tahan, kekerasan, konduktivitas yang buruk, dan titik leleh yang tinggi. Keramik tahan terhadap suhu yang tinggi, umumnya berkisar antara 1.000°C hingga 1.600°C (Tite, 2008).

Produksi keramik di luar negeri umumnya menggunakan campuran bahan baku kaolin, feldspat, ball clay, kuarsa, dan air. Kaolin adalah batuan lempung berwarna putih yang tetap berwarna putih setelah dibakar. Kaolin memiliki kekerasan 2-2,5 (skala Mohs), berat jenis 2,60-2,63, daya hantar panas dan listrik rendah, serta kadar asam (pH) yang bervariasi. Komposisi kimia kaolin adalah aluminium silikat ($2\text{H}_2\text{O}$, Al_2O_3 , SiO_2) dengan mineral utama kaolinit, nakrit, dan halloysit. Kaolin memberikan sifat plastis sehingga mudah dibentuk sebelum dibakar. Kaolin dan ball clay yang digunakan bersama-sama akan meningkatkan keplastisan massa dan memperkuat kekuatan kering produk (Garinas, 2009).

Seiring dengan perkembangan zaman dan teknologi, tuntutan pasar industri keramik semakin kompleks. Hal ini menyebabkan perlunya inovasi baru untuk menggantikan produksi keramik metode konvensional dengan metode modern. Salah satu inovasi tersebut adalah pemanfaatan senyawa organologam melalui teknologi keramik turunan polimer (PDCs). PDCs adalah keramik yang berasal dari prekursor polimer prakeramik. PDCs terbuat dari polimer organosilikon yang dipolimerisasi dengan bantuan panas. PDCs merupakan alternatif yang kuat dalam teknologi sintesis yang dapat menggantikan keramik konvensional dalam rentang keramik tertentu (Chaudhary et al., 2022).

PDCs memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan keramik konvensional, yaitu: Dapat diproduksi dengan biaya yang lebih rendah, dapat diproduksi dengan bentuk dan ukuran yang lebih kompleks, memiliki sifat-sifat yang lebih homogen. PDCs telah banyak diteliti dan dikembangkan untuk berbagai aplikasi. PDCs telah digunakan dalam berbagai bidang, seperti: alam industri otomotif untuk membuat komponen yang tahan panas dan tahan korosi, dalam industri elektronik untuk membuat komponen yang tahan panas dan memiliki sifat listrik yang baik, dan dalam medis untuk pembuatan implan dan alat bedah (Barroso et al., 2019; Packirisamy et al., 2020). Berdasarkan hal tersebut, maka artikel review ini bertujuan untuk memberikan informasi mengenai teknologi keramik turunan polimer (PDCs) dengan pemanfaatan senyawa organologam yaitu organosilikon sebagai inovasi dalam dunia industri keramik.

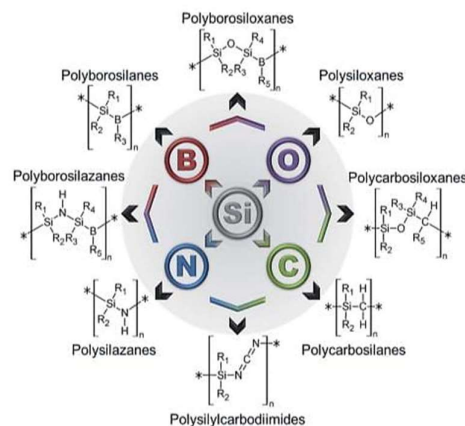
METODE PENELITIAN

Penulisan artikel review ini menggunakan metode studi pustaka yang melibatkan penelusuran referensi dari artikel atau jurnal nasional dan internasional yang diterbitkan dalam kurun waktu 20 tahun terakhir (2003-2023). Referensi yang dipilih adalah referensi yang memiliki keterkaitan dengan masalah yang dikaji. Referensi tersebut kemudian dikumpulkan, dibaca, dan dianalisis secara mendalam untuk kemudian dikelompokkan berdasarkan tema atau topik yang relevan. Hasil analisis referensi tersebut kemudian dituliskan dalam bentuk artikel review yang sistematis dan komprehensif.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Polimer Organosilikon

Polimer prekeramik adalah senyawa yang mengandung unsur logam dan unsur organik. Polimer prekeramik umumnya berbasis silikon dengan unsur tambahan seperti karbon, nitrogen, oksigen, dan bahkan logam seperti boron atau aluminium. Gugus samping, terutama organik, terhubung pada struktur rangka polimer prekeramik. Gugus samping ini meliputi hidrogen, alkil, vinil, aril, dan lain-lain (Riedel et al., 2006). Sifat-sifat polimer prekeramik, seperti stabilitas kimia dan termal, kelarutan, reaktivitas, dan karakteristik optik, dipengaruhi oleh struktur rangka dan gugus samping. Komposisi akhir PDCs (polymer-derived ceramics) juga dipengaruhi oleh struktur rangka dan gugus samping (Fu et al., 2019). Polimer organosilikon adalah salah satu jenis polimer prekeramik yang paling banyak diteliti. Polimer organosilikon umumnya dibagi menjadi delapan jenis, yaitu: polysiloxane, polycarbosiloxane, polycarbosilane, polysilylcarbodiimides, polysilazane, polyborosilazanes, polyborosilanes, polycarbosiloxanes seperti yang ditunjukkan oleh gambar 1, serta perbedaan diantaranya berdasarkan struktur, metode sintesis, sifat material serta kegunaannya seperti yang ditunjukkan pada tabel 1.



Gambar 1. Jenis polimer organosilikon umum dalam PDCs (Barroso et al., 2019)

Tabel 1. Jenis polimer organosilikon umum dalam PDCs
 Metode sintesis

Polimer organosilikon	Struktur	Sifat	Kegunaan	Referensi
-----------------------	----------	-------	----------	-----------

Polysiloxane	Tiga dimensi -R ₁ R ₂ Si-O-	- Proses sol-gel - Penataan ulang monomer azidopropyl-siloxane - Reaksi epoxy polydimethylsiloxane dengan asam akrilat - Reaksi polysiloxane dengan logam alkoksida	- Anti air dan tahan terhadap kelembapan - Stabilitas termal tinggi - Flexibility	Sintesis keramik berbasis silikon oksikarbida melalui dekomposisi termal dalam atmosfer gas inert	(Colombo et al., 2010) (Ionescu et al., 2012) (Fu et al., 2019; Hackbarth et al., 2024)
Polycarbosilo-xane	Tiga dimensi -R ₁ R ₂ Si-O-C-	Penambahan trietoksivinilsilana ke siklokarbo-siloxan fungsi-onal Si-H	- Konduktivitas termal tinggi - Modulus elastisitas tinggi - Memiliki kepadatan yang rendah	- Pembuatan serat silikon karbida - Pelapis keramik - Bahan pengikat anorganik	(Cramer et al., 2020) (Sacaescu, 2009) (Yang et al., 2023) (Zhang et al., 2020)
Polycarbosilane	Tiga dimensi -R ₁ R ₂ Si-C-	- Penataan ulang Kumada - Polimerisasi pembukaan cincin - Reaksi dehydrocoupling trimetilsilana - Hidrosilasi vinilhidridosilan - Reaksi coupling Grignard (klorometil) trietoksisisilana dan vinilmagnesium bromida	- Termal yang baik - Mekanik yang baik - Tahan terhadap oksidasi	- Prekursor SiC - Konduktor listrik	(Lodhe et al., 2015) (Chen et al., 2008) (Wang & Song, 2018) (He et al., 2015)
Polysilycarbodiimides	Tiga dimensi -R ₁ R ₂ Si-N=C=N-	Reaksi polikondensasi katalis piridin dari klorosilana dengan bis(trimethylsilylcarbodiimide)	- Termal yang baik - Mekanik yang baik - Tahan terhadap oksidasi	Prekursor SiCN	(Iwamoto et al., 2004)
Polysilazanes	Tiga dimensi -R ₁ R ₂ Si-N=	- Reaksi amonolisis klorosilana dengan amonia - Reaksi aminolisis dengan berbagai amina primer - Pembukaan ring polimerisasi polysilazane siklik	- Ikatan Si-N mudah terputus - Stabilitas termal tinggi - Tahan oksidasi	- Prekursor pembuatan keramik dari Si₃N₄ atau SiCN - Penghalang untuk pertukaran panas dan oksidasi pada baja	(Colombo et al., 2010) (Mera et al., 2015) (Horz et al., 2005) (Fu et al., 2019)
Polyborosila-zane	Tiga Dimensi -R ₁ R ₂ Si-N(R ₃ R ₄ B)-	Reaksi kondensasi dari heksametil-disilazana, boron triklorida, dan triklorosilan	- Stabilitas termal tinggi - Tahan oksidasi	Prekursor pembuatan keramik SiCBN	(Zhang et al., 2016) (Widgeon, et al., 2013) (Zhang et al., 2011) (Lee et al., 2005)
Polyborosilo-xanes	Tiga dimensi -R ₁ R ₂ Si-O-B-	- Reaksi Piers-Rubinsztajn - Pemanasan PDMS dan BA	- Stabilitas termal yang baik - Tahan terhadap panas dan api - T_{maks} hingga 650°C	- Komposit matriks keramik - Keramik anti api atau panas	(Liu et al., 2014) (Drozdzov et al., 2019) (Gunes & Karagoz, 2022)

1.1 Polysiloxanes

Polysiloxane adalah polimer yang terdiri dari unit siloksan (-R₁Si-O-SiR₂-). Unit siloksan terdiri dari dua atom silikon yang terikat dengan satu atom oksigen dan dua gugus organik. Struktur polysiloxane dapat dikatakan tiga dimensi karena unit siloksan terikat satu sama lain membentuk rantai panjang yang saling terhubung. Polysiloxane juga dikenal sebagai silikon dan dapat berupa cairan, gel, atau elastomer. Sifat-sifat polysiloxane bervariasi tergantung pada strukturnya. Polysiloxane juga dapat disintesis dengan teknik sol-gel yang dimulai dari berbagai alkoksisisilan tersubstitusi. Teknik sol-gel memungkinkan modifikasi kimia organosilan di- dan trifungsional melalui hidrolisis dengan alkoksisisilan atau alkoksida logam transisi (Colombo et al., 2010).

Polysiloxane yang memiliki gugus organik yang besar dan tidak tersubstitusi memiliki konduktivitas termal yang rendah, reaktivitas kimia yang rendah, dan stabilitas termal yang tinggi. Polysiloxane telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti sealant, adhesif, pelumas, isolasi termal listrik, dan dalam pembuatan keramik. Dalam pembuatan keramik, polysiloxane dapat dimodifikasi dengan gugus fungsional tertentu untuk menghasilkan senyawa prekeramik yang dapat digunakan dalam pembuatan keramik dengan sifat-sifat yang diinginkan (Ionescu et al., 2012).

1.2 Polycarbosiloxane

Polycarbosiloxane adalah polimer yang terdiri dari satuan karbosiloksana (C(SiO)₂Si). Senyawa ini merupakan prekursor untuk keramik silikon karbida, yang memiliki sifat mekanik yang unggul, seperti modulus elastisitas yang tinggi, kekuatan, dan ketahanan (Zhang et

al., 2020). Polycarbosiloxane memiliki struktur tiga dimensi yang kompleks dan dapat membentuk lapisan keramik dari lelehan atau larutan polimer. Senyawa ini juga memiliki potensi sebagai prekursor silikon karbida, terutama sebagai sumber serat keramik kontinu (Cramer et al., 2020).

Polycarbosiloxane telah menjadi fokus penelitian karena potensi penerapannya dalam berbagai bidang. Senyawa ini memiliki berat molekul rata-rata sekitar 1100-2000 dan memiliki sifat fisik berupa padatan transparan berwarna kuning muda dengan hasil keramik sekitar 55% atau lebih. Polycarbosiloxane juga dapat dimodifikasi untuk aplikasi tertentu dalam pembuatan keramik (Yang et al., 2023).

1.3 Polycarbosilanes

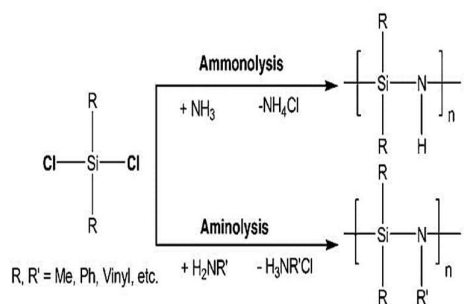
Struktur polikarbosilan kompleks karena berbagai jenis rantai karbon yang dapat dihubungkan ke tulang belakang polimer. Beberapa jenis rantai karbon yang umum ditemukan pada polikarbosilan adalah metilen, vinyliden, dan fenilen. Ada beberapa metode untuk mensintesis polikarbosilan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah reaksi penataan ulang Kumada. Reaksi ini dapat dilakukan dalam kondisi tekanan tinggi atau tekanan atmosfer. Metode lain yang dapat digunakan meliputi polimerisasi pembukaan cincin, reaksi dehydrocoupling trimetilsilana, hidrosilasi vinilhidridosilan, dan reaksi kopling Grignard dari (klorometil)trietoksisilana dan vinilmagnesium bromide (Chen et al., 2008; Lodhe et al., 2015). Polikarbosilan memiliki sifat termal yang baik dan dapat diubah menjadi keramik silikon karbida (SiC) melalui proses pirolisis (He et al., 2015). Polimer ini juga memiliki sifat mekanik yang baik dan tahan terhadap oksidasi. Polikarbosilan telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk sebagai konduktor listrik, photoresist, bahan optik nonlinier, dan prekursor prakeramik untuk pembuatan serat SiC.

1.4 Polysilycarbodiimides

Polysilycarbodiimides adalah prekursor prakeramik yang dapat digunakan untuk membuat keramik berbasis silikon karbida (SiCN). Prekursor ini dapat disintesis melalui reaksi polikondensasi klorosilan yang dikatalisis piridin dengan bis (trimetil-silikarbodiimida) (Iwamoto et al., 2004). Polysilycarbodiimides memiliki sifat termal yang baik dan dapat diubah menjadi keramik SiCN melalui proses pirolisis. Proses pirolisis adalah proses penguraian senyawa organik menjadi senyawa anorganik dengan pemanasan. Dalam proses ini, polysilycarbodiimides akan terdegradasi menjadi keramik SiCN. Selain itu, polysilycarbodiimides juga memiliki sifat mekanik yang baik dan tahan terhadap oksidasi. Sifat mekanik yang baik dari polysilycarbodiimides disebabkan oleh strukturnya yang kompleks. Struktur ini terdiri dari rantai karbon yang terikat dengan atom silikon dan nitrogen. Struktur ini memberikan kekuatan dan kekakuan pada polysilycarbodiimides. Polysilycarbodiimides telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan komposit, pelapis, dan biomaterial.

1.5 Polysilazanes

Penelitian awal tentang preparasi, klasifikasi, dan karakterisasi silazanes dan polysilazanes dimulai pada tahun 1885 dan terus berlanjut hingga tahun 1957 (Colombo et al., 2010). Polysilazanes adalah polimer yang terdiri dari atom silikon dan nitrogen yang terikat secara kovalen dalam struktur tiga dimensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Gugus samping karbon juga dapat ditemukan pada polysilazanes. Sintesis polysilazanes pertama kali dilakukan untuk mensintesis silikon nitrida melalui konversi termal $\text{Si}[\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_3)_2]_4$ dalam atmosfer argon. Proses ini diharapkan terjadi secara mirip dengan pembentukan silika dari silikon alkoksida. Namun, proses ini justru menghasilkan pembentukan silikon karbonitrida, SiCN. Polysilazanes dapat digunakan sebagai prekursor untuk pembuatan keramik SiCN. Keramik SiCN memiliki sifat mekanik dan termal yang unggul, sehingga memiliki potensi aplikasi yang luas di berbagai bidang (Mera et al., 2015).



Gambar 2. Sintesis polysilazanes (Riedel et al., 2006)

Berdasarkan Gambar 2, sintesis polysilazanes dapat dilakukan melalui dua cara utama, yaitu reaksi amonolisis klorosilana dengan amonia atau reaksi aminolisis dengan berbagai amina primer. Kedua metode ini memiliki kelemahan, yaitu sulit untuk memisahkan produk reaksi polimerik dari produk padat, NH_4Cl atau H_3NRCl (Horz et al., 2005). Di sisi lain, pembukaan cincin polimerisasi polysilazanes siklik adalah cara lain yang efisien untuk mensintesis polysilazanes. Energi ikatan silikon-nitrogen lebih kecil dari energi ikatan silikon-oksigen ataupun silikon-karbon, dengan nilai berkisar 360 kJ/mol. Energi ikatan yang lebih kecil ini membuat ikatan silikon-nitrogen lebih reaktif dan mudah berubah menjadi ikatan lain dalam beberapa reaksi kimia. Hal ini bermanfaat untuk pembentukan senyawa baru pada kondisi tertentu. Selain itu, polysilazanes memiliki sifat-sifat yang menguntungkan, seperti stabilitas termal yang tinggi, ketahanan oksidasi, dan ketahanan terhadap korosi. Sifat-sifat ini meningkatkan penggunaan polysilazanes secara luas sebagai penghalang untuk pertukaran panas dan oksidasi pada baja (Fu et al., 2019).

1.6 Polyborosilazanes

Penelitian menunjukkan bahwa PDCs (polycarbosilazanes) dapat ditingkatkan performanya pada suhu tinggi dengan menambahkan boron. Boron dapat menghambat kristalisasi SiC dan menekan dekomposisi Si₃N₄, sehingga meningkatkan stabilitas termal keramik SiBCN. Keramik SiBCN memiliki kekuatan dan stabilitas termal yang jauh lebih baik daripada PDCs, terutama dalam hal oksidasi dan kristalisasi. Oleh karena itu, keramik SiBCN banyak digunakan sebagai serat dalam komposit dan membran, serta material bersuhu tinggi (Zhang et al., 2016).

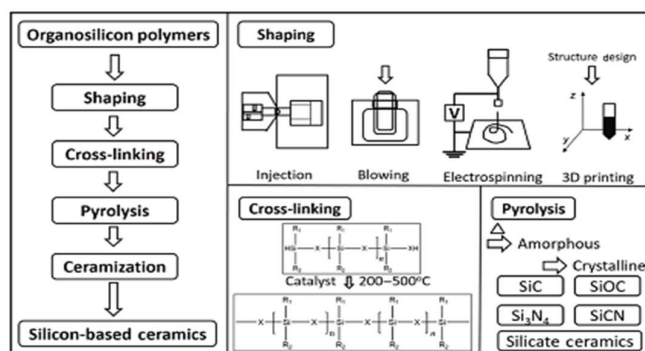
Prekursor polyborosilazane dengan gugus X = –NR– mengarah ke struktur yang mengandung SiCN, di mana atom Si terkoordinasi secara tetrahedral terikat pada atom C dan N (Widgeon et al., 2013). Polyborosilazane dapat disintesis dengan dua metode, yaitu metode lama melalui reaksi amonolisis Si–Cl dan senyawa yang mengandung B–Cl (Zhang et al., 2011), serta metode baru melalui reaksi kondensasi dari heksametilidisilazana, boron triklorida, dan triklorosilan pada suhu berkisar dari 125°C - 200°C. Metode baru ini lebih terjangkau dan sederhana daripada metode lama (Lee et al., 2005).

1.7 Polyborosiloxane

Polyborosiloxane adalah polimer turunan organosilikon yang mengandung ikatan Si–O–B. Polimer ini dapat disintesis dengan dua metode, yaitu reaksi Piers-Rubinsztajn (Drozdov et al., 2019) dan reaksi pemanasan campuran PDMS dan BA). Reaksi Piers-Rubinsztajn adalah reaksi kimia yang melibatkan penggabungan dua atau lebih polimer secara kimia melalui ikatan kovalen. Pada reaksi ini, polyborosiloxane disintesis dari polydimethylsiloxane (PDMS) dengan menambahkan asam borat (BA) dan katalis. Reaksi pemanasan campuran PDMS dan BA adalah reaksi kimia yang melibatkan pemanasan campuran PDMS dan BA hingga suhu 200°C (Liu et al., 2014). Pada reaksi ini, polyborosiloxane disintesis melalui proses ikatan silang (cross-linking). Polyborosiloxane memiliki kestabilan termal yang baik, yaitu mampu bertahan pada suhu tinggi hingga 650°C (Gunes & Karagoz, 2022). Sifat ini menjadikan polyborosiloxane sebagai bahan potensial untuk aplikasi di bidang keramik, seperti komposit matriks keramik dan keramik tahan panas dan api.

2 Proses Transformasi Polimer Organosilikon Menjadi Keramik

Pembuatan keramik berbasis silikon dari polimer organosilikon dimulai dengan sintesis polimer organosilikon. Polimer organosilikon yang umum digunakan adalah polysiloxane, polycarbosiloxane, polycarbosilane, polysilycarbodiimides, polysilazane, polyborosilazanes, polyborosilanes, dan polyborosiloxanes. Sintesis polimer organosilikon merupakan langkah penting karena menentukan komposisi dan sifat akhir dari keramik yang akan dibuat. Proses utama selanjutnya dalam transformasi polimer organosilikon menjadi keramik berbasis silikon adalah pembentukan (*shaping*), ikatan silang (*cross-linking*), *pyrolysis*, dan *ceramization*. Pembentukan (*shaping*) adalah proses pemberian bentuk pada polimer organosilikon. Ikatan silang (*cross-linking*) adalah proses pembentukan ikatan antar molekul polimer organosilikon untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas. *Pyrolysis* adalah proses penguraian polimer organosilikon menjadi keramik melalui pemanasan pada suhu tinggi. *Ceramization* adalah proses pematangan keramik yang terbentuk melalui pemanasan pada suhu tinggi. Proses-proses tersebut ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Proses polimer organosilikon menjadi keramik berbasis silikon (Fu et al., 2019)

2.1 Pembentukan (*Shaping*)

Keramik berbasis silikon sulit untuk dibentuk menjadi bentuk tertentu karena sifat reologi bubuk mentah yang buruk. Umumnya, pembentukan keramik dilakukan dengan menambahkan bahan pengikat polimer yang akan terbakar selama sintering. Proses fabrikasi keramik cukup rumit, meliputi persiapan serbuk keramik, pembentukan dengan bantuan bahan pengikat, dan sintering untuk pemadatan. Polimer organosilikon dapat dibentuk secara langsung tanpa persiapan bubuk keramik. Berbagai metode dapat diterapkan untuk membentuk polimer organosilikon, seperti cetakan injeksi, cetakan tiup, cetakan ekstrusi, pelapisan, *electrospinning*, pencetakan 3D, dan lain-lain (Fu et al., 2019).

Proses sintering polimer organosilikon melibatkan pirolisis dan transformasi polimer menjadi keramik. Komposisi fasa dan struktur mikro keramik akhir ditentukan oleh proses sintering, yang meliputi laju pemanasan, atmosfer reaksi, suhu reaksi, dan waktu penahanan. Keramik berbasis silikon yang berbeda dapat dibuat dengan memilih polimer organosilikon yang sesuai. Keramik berbasis silikon yang berasal dari polimer organosilikon sering kali mengalami keretakan, pembentukan pori-pori, dan penyusutan yang besar. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dimungkinkan untuk membuat keramik yang relatif padat dan bebas retak dengan menambahkan bahan pengisi ke dalam polimer prakeramik (Harshe et al., 2004).

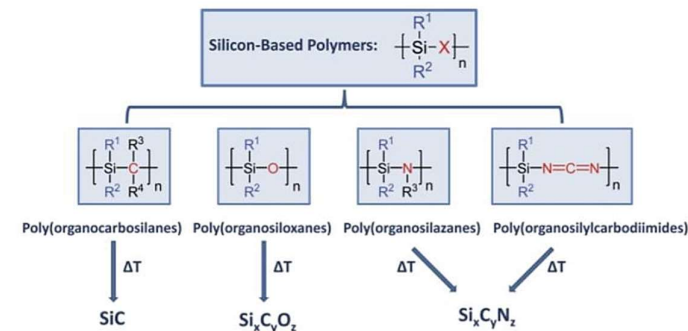
2.2 Ikatan silang (Cross-linking)

Ikatan silang (Cross-linking) adalah proses di mana rantai polimer saling terhubung untuk membentuk jaringan tiga dimensi. Proses ini penting untuk hampir semua proses manufaktur struktur PDC karena memungkinkan prekursor untuk berubah dari bahan organik termoplastik yang fleksibel (diperlukan untuk membentuk) menjadi termoset yang kaku dan tidak larut, dan melestarikan struktur selama pemrosesan pasca. Crosslinking dapat terjadi melalui berbagai mekanisme, paling sering dengan crosslinking termal dalam kisaran 100-250°C di bawah aliran udara, ikatan silang dengan klorosilan, atau dengan radiasi. Pada ikatan silang termal, gugus fungsional seperti Si-H, Si-OH, dan Si-vinil dapat mengalami reaksi hidrosililasi (adisi) atau silanol-silanol (kondensasi) (Colombo et al., 2010) untuk membentuk ikatan silang. Ikatan silang termal di atmosfer udara secara konvensional menjadi metode yang populer untuk menyembuhkan PCP untuk menyediakan SiO₂ hasil.

Pemanfaatan katalis dapat membantu mempercepat ikatan silang termal dan meningkatkan stabilitas bentuk polimer prakeramik. Katalis dapat memfasilitasi pembentukan ikatan silang antara oligomer volatil, yang biasanya menguap atau menurunkan selama pemrosesan (Janakiraman & Aldinger, 2009). Ikatan silang dengan radiasi UV dapat digunakan ketika PCP mengandung fotosensitif kelompok fungsional dalam strukturnya. Metode ini sebagian besar bisa efektif ketika digunakan untuk polimer prakeramik ikatan silang dalam bentuk serat atau struktur tipis karena kedalaman penetrasi yang terbatas (Schulz et al., 2004; Eick & Youngblood, 2009). Mekanisme ikatan silang umum lainnya yang disebut "polimerisasi radikal bebas" digunakan untuk aditif fotopolimerisasi PPN teknik manufaktur (AM). Metode ini melibatkan penyerapan foton UV dengan fotoinisiator (PI). Proses ini menghasilkan radikal bebas yang sangat reaktif (R) yang bereaksi dengan monomer (M), yang mengarah pada pembentukan rantai polimer dan perkembangan proses polimerisasi.

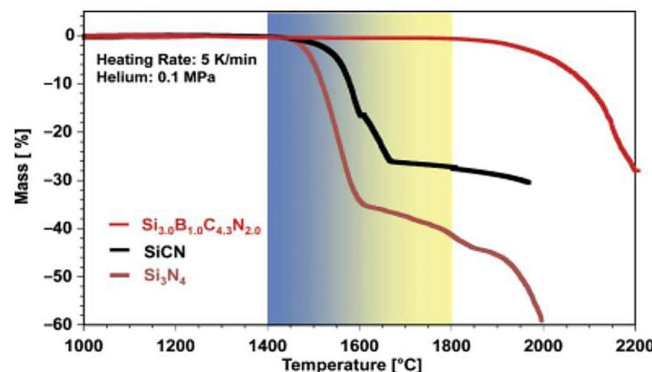
2.3 Pyrolysis

Pyrolysis adalah proses lanjutan dari ikatan silang. Pada proses pirolisis, bubuk ikatan silang (*cross-linked powder*) berubah menjadi bubuk amorf, di mana PCP diubah menjadi bahan keramik melalui berbagai proses termal. Proses dekomposisi termal polimer berbasis silikon ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Dekomposisi termal polimer berbasis silikon (Colombo et al., 2010)

Mekanisme reaksi selama pirolisis telah dipelajari menggunakan berbagai teknik spektroskopi dan analisis termogravimetri. Teknik-teknik ini memungkinkan para peneliti untuk mengidentifikasi produk pirolisis dan mempelajari kinetika reaksi. Analisis termogravimetri (TGA) adalah metode yang efektif untuk analisis kuantitatif dekomposisi polimer prakeramik. TGA mengukur perubahan massa sampel seiring dengan meningkatnya suhu. Kurva TGA dapat digunakan untuk mengidentifikasi tiga tahap utama dalam pirolisis polimer prakeramik yaitu evaporasi, amorphisasi, kristalisasi. Gambar 5 menunjukkan kurva TGA untuk pirolisis polimer prakeramik yang menunjukkan tiga tahap utama.



Gambar 5. Pengukuran termal gravimetri keramik SBCN dibandingkan dengan SiCN dan Si₃N₄ hingga 2200°C (Colombo et al., 2010)

Proses pertama adalah evaporasi dari unsur-unsur organik yang ada pada polimer tersebut. Proses kedua adalah proses utama dimana terjadi amorphisasi dari polimer. Sampai proses ini, berat akan berkurang 30-40% dari berat awal. Proses terakhir adalah kristalisasi dari amorphous polimer (Colombo et al., 2010). Termal proses ini ialah termasuk proses pengepresan panas, sintering spark plasma, deposisi

uap kimia, penyemprotan plasma, rapid thermal annealing, pirolisis laser, pemanasan gelombang mikro, dan metode yang paling umum digunakan yaitu pirolisis dalam atmosfer argon atau nitrogen. Pirolisis dalam atmosfer inert mengarah pada pembentukan keramik kovalen amorf dengan penguraian rantai samping organik (gugus metil/fenil/vinil) atau Si-H, Si-OH, atau gugus Si-NHx dan penghilangan produk sampingan berbentuk gas secara bertahap pada suhu tinggi (600–1000°C) (Sarraf et al., 2023).

Proses keramikisasi dapat dilakukan secara termal atau non-termal. Proses termal melibatkan pemanasan polimer prakeramik di bawah tekanan atmosfer inert (argon atau nitrogen) untuk menghasilkan keramik kovalen amorf (SiC, Si₃N₄, SiCN, SiBC, atau SiCBN). Proses non-termal melibatkan iradiasi ion untuk menghilangkan atom hidrogen melalui pembelahan ikatan C-H. Jika masih tersisa karbon, karbon dapat diubah menjadi gugus karbon seperti berlian. Atmosfer pirolisis dapat mempengaruhi komposisi komponen keramik akhir. Pirolisis di udara dapat digunakan untuk membentuk keramik silikat menggunakan bahan pengisi oksida logam aktif. Selama proses keramikisasi prekeramik, parameter yang penting adalah laju pemanasan, atmosfer reaksi, suhu reaksi, dan waktu tinggal. Parameter-parameter ini mempengaruhi komposisi fasa dan struktur mikro keramik akhir. Tingkat kristalisasi, reaksi reduksi karbotermal, dan reaksi pengisi dalam material dipengaruhi oleh parameter-parameter tersebut. Pirolisis polisiloksan/polisilsesquioxanes di atmosfer udara telah banyak digunakan untuk pembuatan keramik oksida menggunakan bahan pengisi aktif (Sarraf et al., 2023).

2.4 Ceramization

Keramisasi (*Ceramization*) adalah proses penting dalam pembuatan keramik berkualitas tinggi dari polimer prakeramik. Proses ini melibatkan pemanasan polimer secara bertahap hingga suhu sekitar 1000°C, di mana polimer akan kehilangan komponen organiknya dan berubah menjadi bahan keramik. Proses keramisasi dapat dibagi menjadi dua tahap: yaitu tahap pertama yang melibatkan pembentukan fase kaca (*glassy phase*) dan tahap kedua melibatkan pembentukan fase keramik (*petedunnite*). Penambahan nano silikat dapat meningkatkan kinerja proses keramisasi dan mengurangi suhu sintering. Nano silikat dapat membantu untuk meningkatkan difusi, dissolution, dan presipitasi, yang merupakan mekanisme penting dalam proses keramisasi. Mekanisme keramisasi melibatkan peleburan glass frit untuk membentuk fase cair. Fase cair ini kemudian akan mengalami transfer zat, seperti difusi, *dissolution*, dan presipitasi (Li et al., 2020). Transfer zat ini akan menyebabkan terjadinya pembentukan fase kaca dan fase keramik. Setelah proses keramisasi, proses kristalisasi akan dilanjutkan. Proses kristalisasi melibatkan pembentukan struktur kristal dalam bahan keramik. Suhu pemrosesan untuk PDCs biasanya selesai pada 1100–1300°C. Namun, beberapa bahan membutuhkan suhu yang lebih tinggi untuk membentuk kristal, di mana suhu yang digunakan dapat mencapai lebih dari 1700°C (Barroso et al., 2018).

3 Aplikasi PDCs

Beberapa aplikasi dari PDCs (polymer-derived ceramics) berdasarkan pada jenis prekursor dan sifat materialnya ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Aplikasi, prekursor, sifat, dan stabilitas termal dari PDCs

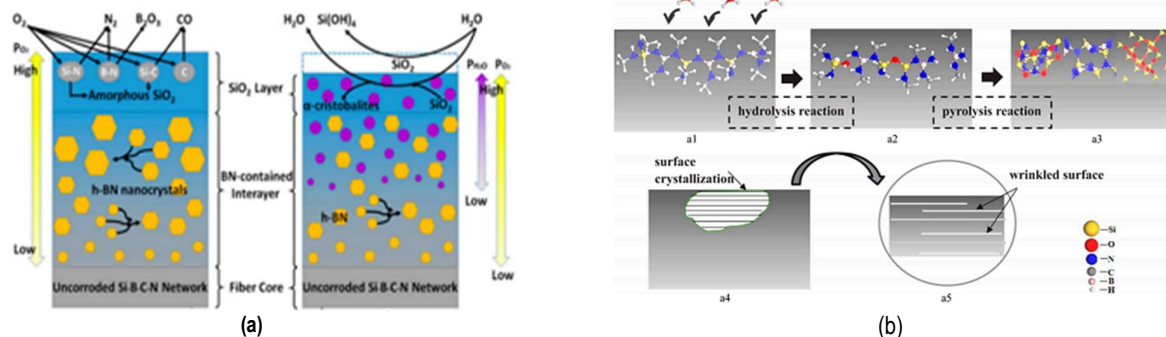
Aplikasi	PDC	Prekursor	Sifat	Stabilitas termal (°C)	Referensi
Serat (Fiber)	SiCN	Polysilazane	D = 100 µm	1400	(Flores et al., 2013)
	SiBCN	Polyborosilazane	$\sigma_T = 1.03$ GPa	1600	(Zhang et al., 2018)
	SiOC	Polycarbosilane	WCA = 135°	700	(Wu et al., 2017)
	SiBOC	Polyborosiloxane	D = 1 µm	800	(Xie et al., 2015)
Pelapisan (Coating) Membran	SiOC	Polysiloxane	Conductivity = 11 mW m ⁻¹ K ⁻¹	1000	(Biesuz et al., 2020)
	SiCN	Polysilylcarbodiimide	E = 105–117 GPa Hardness = 10–11 GPa SEI = 72 dB at Ka	1400	(Klausmann et al., 2015)
	SiOC	Polycarbosilane	CTE = 4.43–7.36 × 10 ⁻⁶	1000	(Jia et al., 2020)
	SiOC	Polysiloxane		1400	(Liu et al., 2013)
Semikonduktor	SiCN	Polysilazane	E = 80–225 GPa	1650	(Kong et al., 2003)
Sensor	SiCNO	Polysilazane	BG = 2.2 eV	1300	(Ryu et al., 2010)
	SiCN	Polysilazane	R = 60 kΩ	1400	(Seo et al., 2011)
	SiCN	Polysilazane	Sensitivity = 290 kHz kPa ⁻¹	800	(Yu & Liu, 2020)
	SiBCN	Polyborosilazane	GF = 5500	1000	(Shao et al., 2020)
	SiCN	Polysilazane	BG = 0.08 eV	1000	(Hu & Raj, 2015)
	SiCNO	Polyvinylsilazane	EC = 1.39 × 10 ⁻⁷	600	(Yu et al., 2017)

3.1 Serat (Fibers)

Keramik turunan polimer (PDC) adalah bahan yang dapat digunakan sebagai penguat serat dalam berbagai aplikasi, termasuk industri kedirgantaraan. PDC memiliki modulus elastisitas dan kekuatan mekanik yang mirip dengan bahan penguat karbon, sehingga dapat memberikan kekuatan dan dukungan struktural pada komposit. umumnya dalam bentuk struktur jaringan 3D kompleks yang dirancang agar sesuai dengan bentuk akhir komponen (Ren et al., 2021).

Penelitian oleh Ji et al. (2018) menunjukkan bahwa fiber SiBCN amorf, yang berasal dari polyborosilazane, memiliki sifat antioksidasi yang baik pada suhu tinggi. Karakterisasi struktural awal menunjukkan bahwa fiber tersebut terdiri dari tetrahedron silikon-nitrida (SN₃C, SiN₄),

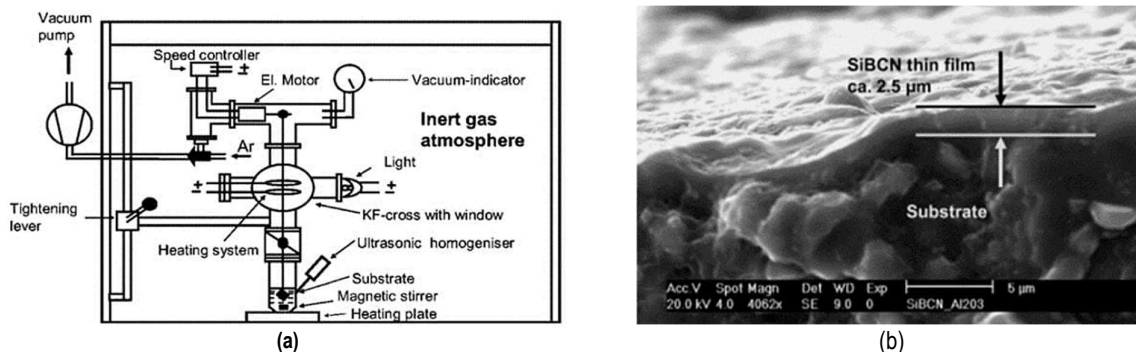
karbon bebas, cincin heksatomik BN, dan fase BN_2C . Namun, penyelidikan struktural selanjutnya menunjukkan bahwa fiber tersebut memiliki morfologi yang terpelihara dengan baik, bahkan setelah terpapar suhu tinggi. Hal ini disebabkan oleh pembentukan dua lapisan tambahan di permukaan serat, yaitu lapisan SiO_2 dan lapisan BN heksagonal, dan intinya adalah struktur SiBCN amorf. Struktur mikro fiber SiBCN memiliki skema seperti yang ditunjukkan pada gambar 6(a). Liu et al. (2018) mempelajari pengaruh hidrolisis polyborosilazane pada fiber keramik SiBN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hidrolisis menyebabkan pembentukan gugus Si-O-Si pada prekursor. Oksigen yang terkandung dalam prekursor tersebut kemudian mengubah fitur permukaan fiber PDC pirolisis dan menyebabkan pembentukan $\beta\text{-SiO}_2$ pada suhu 1400°C . Hal ini menyebabkan penurunan stabilitas termal fiber karena kristalisasi yang lebih awal seperti yang ditunjukkan pada gambar 6(b).



Gambar 6. Skema struktur mikro fiber SiBCN (Ji et al., 2018) (a), Skema reaksi hidrolisis dan pirolisis pada fiber (Liu et al., 2018) (b)

3.2 Pelapisan (coatings) membran

Salah satu bahan PDC (*preceramic polymer-derived ceramic*) yaitu SiBCN memiliki ketahanan yang baik pada suhu tinggi (Ren et al., 2021). Hal ini menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan membran alumina komersial, termasuk kemudahan manufaktur melalui proses sol-gel, stabilitas termal tinggi, ketahanan terhadap oksidasi, dan perubahan fase. Gambar 7(a) menunjukkan pengaturan proses sintesis coating. Film keramik SiBCN dengan ketebalan 2,5 mikron diproduksi pada alumina berpori dengan ukuran pori 0,6-6 nm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7(b). Film SiBCN ini, yang berasal dari prekursor prekeramik siklik dan boran dimetilsulfida, menunjukkan stabilitas termal tinggi pada 1400°C dalam lingkungan inert. Penurunan massa hanya sebesar 1% berat selama 50 jam, dan film tersebut bebas dari kristalisasi (Hauser et al., 2006).



Gambar 7. Skema pengaturan sintesis coating/pelapis (Hauser et al., 2006) (a), Gambar SEM dari penampang membran SiBCN pada substrat alumina (Hauser et al., 2006) (b)

PDC keramik juga telah menjadi bahan yang menarik untuk digunakan sebagai coatings. Hal ini karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bahan coatings lainnya, seperti membran, yaitu: Proses produksi yang mudah, terutama pada permukaan kompleks yang besar. Kinerja struktural dan termal yang baik pada suhu proses pirolisis, bahkan serendah 800°C . Namun, kelemahan utama penggunaan PDC adalah ketebalan lapisannya yang terbatas hanya pada beberapa mikron akibat dari penyusutan termal saat pirolisis. Oleh karena itu, filter aktif atau pasif dapat ditambahkan ke dalam sistem untuk mengontrol penyusutan volumetrik dan meningkatkan fungsionalitas coatings (Alvi & Akhtar, 2018).

Salah satu penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa perubahan struktur pada suhu tinggi dari coatings SiCN dengan tebal satu mikron yang berasal dari prekursor polisililkarbodiimida berbasis linear dan bercabang melalui spin coating. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja termal dan mekanikal coatings SiCN secara langsung terkait dengan kandungan karbonnya. Coatings SiCN dengan kandungan karbon yang rendah menunjukkan peningkatan modulus elastisitas dan kekerasan hingga 80% pada suhu ambient, tetapi lebih rendah pada kristalisasi saat pemanasan 1400°C dibandingkan dengan coatings SiCN berkarbon tinggi (Klausmann et al., 2015).

3.3 Semikonduktor

Penelitian oleh Ryu et al. (2010) menunjukkan bahwa PDC SiCNO memiliki sifat semikonduktor pada suhu hingga 1300°C tanpa doping. Celah pita PDC SiCNO bervariasi dari 2,2 hingga 0,1 eV seiring dengan peningkatan suhu dari 1100 - 1400°C . Hasil ini menunjukkan bahwa sifat semikonduktor PDC dapat diubah dengan menyesuaikan komposisi unsurnya. Karakterisasi listrik lebih lanjut oleh Terauds et al. (2010) menunjukkan bahwa PDC SiCNO memiliki piezoresistivitas yang bergantung pada suhu secara signifikan pada suhu hingga 1000°C .

Faktor pengukur PDC SiCNO lebih tinggi satu urutan besarnya dibandingkan dengan material komersial lainnya, seperti Ge, Si, SiC, atau berlian pada batas suhu yang lebih tinggi. Hal ini menjadikan PDC SiCNO sebagai kandidat material alternatif yang efisien untuk sensor tegangan suhu tinggi. Namun, semua sifat listrik dapat dimanipulasi dengan mengendalikan struktur mikro (Seo et al., 2011).

Ketika serat dan komposit PDC mulai digunakan sebagai komponen penting dari aplikasi tingkat lanjut di lingkungan bersuhu tinggi, pengendalian dan pemantauan lingkungan kerja menjadi penting. MEMS berbasis silikon telah digunakan dalam aplikasi seperti sensor atau aktuator, namun menunjukkan kinerja yang terbatas karena stabilitas termal dan mekanik yang buruk pada suhu di atas 250°C dan 600°C. SiC, semikonduktor celah pita lebar, juga telah diusulkan untuk mengatasi batasan suhu kerja Si-MEMS untuk penginderaan suhu tinggi. Selain stabilitas termal yang luar biasa, SiC juga memiliki ketahanan anti-korosi, stabilitas kimia, dan kinerja mekanis yang unggul. Oleh karena itu, SiC menarik perhatian luas untuk aplikasi semikonduktor suhu tinggi (Grossenbacher et al., 2015).

3.4 Sensor

Sensor merupakan komponen penting dalam sistem canggih yang memerlukan deteksi dan kontrol. Misalnya, sensor fluks panas digunakan untuk memantau suhu, tekanan, dan aliran ruang bakar turbin gas aliran (Nagaiah et al., 2006). Sensor PDC diproduksi karena sifatnya yang semikonduktor, terutama karena konduktivitasnya yang bergantung pada suhu. Sensor silikon (SiC) telah banyak digunakan untuk suhu di bawah 500°C. Sensor PDC berpotensi menjadi sensor mikro suhu tinggi yang andal, yang didasarkan pada piezoresistivitas PDC dan didoping, membutuhkan bahan penginderaan untuk menahan lingkungan yang keras pada suhu tinggi tanpa kehilangan fungsionalitas dan strukturnya (Li et al., 2017).

Salah satu desain sensor fluks panas suhu tinggi adalah dengan menggunakan SiCN sebagai lapisan resistansi termal dan lapisan semikonduktor amorf tipis SiAlCN sebagai lapisan resistansi suhu (RTD) (Nagaiah et al., 2006). Penelitian oleh Seo et al. (2011) menguji fotolitografi yang diproduksi film tipis SiCN PDC sebagai RTD pada suhu sedang, dan hasilnya menunjukkan kelayakan sensor fluks panas (Seo et al., 2011). Penelitian oleh Zhao et al. (2014) membuat, menguji, dan membandingkan sensor suhu lengkap dengan termokopel menggunakan SiAlCN sebagai bahan probe. Hasilnya menunjukkan bahwa sensor suhu SiAlCN dapat memberikan hasil yang dapat diulang dan mendekati hasil yang cocok dengan pengukuran termokopel hingga pada suhu 845°C (Zhao et al., 2014). Penelitian oleh Yu et al. (2017) mempelajari sensor SiCNO suhu tinggi yang berasal dari polivinilena tanpa elemen logam atau semikonduktor. SiCNO difungsikan dengan graphene oxide (GO), yang meningkatkan konduktivitas listrik dari matriks keramik. Sensor suhu komposit ini memberikan pengukuran perubahan suhu yang lebih akurat dan sensitif daripada sensor suhu SiCNO (Yu et al., 2017).

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Keramik turunan polimer (PDC) adalah keramik yang dibuat dari prekursor polimer prakeramik organosilikon. Proses pembuatan PDC dimulai dengan sintesis polimer organosilikon, dilanjutkan dengan tahap shaping, cross-linking, pirolisis, dan ceramisasi. PDC memiliki sifat termal yang baik, yaitu tahan terhadap suhu tinggi. Sifat ini menjadikan PDC dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, misalnya sebagai serat dalam bidang kedirgantaraan, sebagai lapisan dan membran, sebagai semikonduktor, dan sebagai sensor.

Saran

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan ilmu material organologam khususnya material keramik turunan polimer (PDC), dengan tujuan akhir dapat menghasilkan material maju (smart-material) yang dapat digunakan dan dimanfaatkan untuk mengatasi berbagai permasalahan dalam bidang kesehatan, energi maupun lingkungan yang ada di masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvi, S. A., & Akhtar, F. (2018). High temperature tribology of polymer derived ceramic composite coatings. *Scientific reports*, 8(1), 15105.
- Barroso, G., Li, Q., Bordia, R. K., & Motz, G. (2019). Polymeric and ceramic silicon-based coatings – a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(5), 1936–1963. <https://doi.org/10.1039/C8TA09054H>
- Biesuz, M., Zera, E., Tomasi, M., Jana, P., Ersen, O., Baaziz, W., Sorarù, G. (2020). Polymer-derived Si₃N₄ nanofelts for flexible, high temperature, lightweight and easy-manufacturable super-thermal insulators. *Applied Materials Today*, 20, 100648.
- Chaudhary, R. P., Parameswaran, C., Idrees, M., Rasaki, A. S., Liu, C., Chen, Z., & Colombo, P. (2022). Additive manufacturing of polymer-derived ceramics: Materials, technologies, properties and potential applications. *Progress in Materials Science*, 128, 100969. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100969>
- Chen, J., He, G., Liao, Z., Zeng, B., Ye, J., Chen, L., Xia, H., & Zhang, L. (2008). Control of structure formation of polycarbosilane synthesized from polydimethylsilane by Kumada rearrangement. *Journal of Applied Polymer Science*, 108(5), 3114–3121. <https://doi.org/10.1002/app.27262>
- Colombo, P., Mera, G., Riedel, R., & Sorarù, G. D. (2010). Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(7), 1805–1837. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03876.x>

- Cramer, C. L., Armstrong, H., Flores-Betancourt, A., Han, L., Elliott, A. M., Lara-Curzio, E., Saito, T., & Nawaz, K. (2020). Processing and properties of SiC composites made via binder jet 3D printing and infiltration and pyrolysis of preceramic polymer. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 2(6), 320–331. <https://doi.org/10.1002/ces2.10070>
- Dongoran, J., Sulistiawati, P., Simangunsong, S. Y., Paksi, P. G. R., & Pasaribu, M. H. (2021). Perkembangan Zeolit Sebagai Katalis Alam Potensial. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*, 3(2), 28–39.
- Drozdz, F. V., Milenin, S. A., Gorodov, V. V., Demchenko, N. V., Buzin, M. I., & Muzafarov, A. M. (2019). Crosslinked polymers based on polyborosiloxanes: Synthesis and properties. *Journal of Organometallic Chemistry*, 72-77.
- Eick, B. M., & Youngblood, J. P. (2009). SiC nanofibers by pyrolysis of electrospun praceramic polymers. *Journal of Materials Science*, 44, 160-165.
- Flores, O., Schmalz, T., Krenkel, W., Heymann, L., & Motz, G. (2013). Selective cross-linking of oligosilazanes to tailored meltable polysilazanes for the processing of ceramic SiCN fibres. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(48), 15406.
- Fu, S., Zhu, M., & Zhu, Y. (2019). Organosilicon polymer-derived ceramics: An overview. *Journal of Advanced Ceramics*, 8(4), 457–478. <https://doi.org/10.1007/s40145-019-0335-3>
- Garinas, W. (2009). Karakteristik Bahan Baku Kaolin Untuk Bahan Pembuatan Badan Isolator Listrik Keramik Porselen Fuse Cut Out (FCO). *Jurnal Sains Dan Teknologi Indonesia*, 11(2), 120–125.
- Grossenbacher, J., Gullo, M., Bakumov, V., Blugan, G., Kuebler, J., & Brugger, J. (2015). On the micrometre precise mould filling of liquid polymer derived ceramic precursor for 300-mm-thick high aspect ratio ceramic MEMS. *Ceramics International*, 41(1), 623-629.
- Gunes, D., & Karagoz, B. (2022). Synthesis of Core–Shell Polyborosiloxanes as a Heat-Resistant Platform. *ACS Omega*, 43877-43882.
- Hackbarth, H. G., Key, T. S., Ackley, B. J., Opletal, G., Rawal, A., Gallington, L., Yang, Y., Thomsen, L., Dickerson, M. B., Pruyn, T. L., & Bedford, N. M. (2024). Uncovering atomic-scale polymer-to-ceramic transformations in SiC polymer derived ceramics from polycarbosilanes. *Journal of the European Ceramic Society*, 44(4), 1932–1945. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.014>
- Harshe, R., Balan, C., & Riedel, R. (2004). Amorphous Si(Al)OC ceramic from polysiloxanes: Bulk ceramic processing, crystallization behavior and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 3471-3482.
- Hauser, R., Nahar-Borchard, S., Riedel, R., Ikuhara, Y. H., & Iwamoto, Y. (2006). Polymer-Derived SiBCN Ceramic and their Potential Application for High Temperature Membranes. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 114(1330), 524-528.
- He, L., Zhang, Z., Yang, X., Jiao, L., Li, Y., & Xu, C. (2015). Liquid polycarbosilanes: synthesis and evaluation as precursors for <sc>SiC</sc> ceramic. *Polymer International*, 64(8), 979–985. <https://doi.org/10.1002/pi.4889>
- Hennicke, H. W., & Hesse, A. (1991). Traditional Ceramics. In *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials* (pp. 488–494). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-034720-2.50135-0>
- Horz, M., Zern, A., Berger, F., & Haug, J. (2005). Novel Polysilazanes as Precursors for Silicon Nitride/Silicon Carbide Composites Without “Free Carbon. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(2), 99-110.
- Hu, L.-H., & Raj, R. (2015). Semiconductive Behavior of Polymer-Derived SiCN Ceramics for Hydrogen Sensing. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(4), 1052-1055.
- Husain, S., Haryanti, N. H., & Manik, T. N. (2016). Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Sifat Mekanik Keramik Berbahan Lempung dan Abu Sekam Padi. *Jurnal Fisika FLux*, 13(1), 1–10.
- Ionescu, E., Kleebe, H.-J., & Riedel, R. (2012). Silicon-containing polymer-derived ceramic nanocomposites (PDC-NCs): preparative approaches and properties. *Chemical Society Reviews*, 41(15), 5032. <https://doi.org/10.1039/c2cs15319j>
- Iwamoto, Y., Volger, W., Kroke, E., Riedel, R., Saitou, T., & Matsunaga, K. (2004). Crystallization Behavior of Amorphous Silicon Carbonitride Ceramics Derived from Organometallic Precursors. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(10), 2170-2178.
- Janakiraman, N., & Aldinger, F. (2009). Fabrication and characterization of fully dense Si-C-N ceramics from a poly(ureamethylvinyl)silazane precursor. *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 163-173.
- Ji, X., Wang, S., Shao, C., & Wang, H. (2018). High-Temperature Corrosion Behavior of SiBCN Fibers for Aerospace Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(23), 19712-19720.

- Jia, Y., Ajayi, T., Roberts, M. J., Chung, C.-C., & Xu, C. (2020). Ultrahigh-Temperature Ceramic–Polymer-Derived SiOC Ceramic Composites for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(41), 46254–46266.
- Klausmann, A., Morita, K., Johanns, K. E., Fasel, C., Durst, K., Mera, G., & Ionescu, E. (2015). Synthesis and high-temperature evolution of polysilylcarbodiimide-derived SiCN ceramic coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(14), 3771–3780.
- Kong, J., Maute, K., Frangopol, D., Liew, L.-A., Saravanan, R., & Raj, R. (2003). A real time human–machine interface for an ultrahigh temperature MEMS sensor–igniter. *Sensors and Actuators A: Physical*, 105(1), 23–30.
- Lee, J., Butt, D. P., Baney, R. H., Bowers, C. R., & Tulenko, J. S. (2005). Synthesis and pyrolysis of novel polysilazane to SiBCN ceramic. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2995–3005.
- Li, N., Cao, Y., Zhao, R., Xu, Y., & An, L. (2017). Polymer-derived SiAlOC ceramic pressure sensor with potential for high-temperature application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 174–178.
- Li, P., Jin, H., Wei, S., Liu, H., Gao, N., & Shi, Z. (2020). Ceramization Mechanism of Ceramizable Silicone Rubber Composites with Nano Silica at Low Temperature. *Materials*, 13(3708), 1–12. doi:10.3390/ma13173708
- Liu, J., Zhang, L., Hu, F., Yang, J., Cheng, L., & Wang, Y. (2013). Polymer-derived yttrium silicate coatings on 2D C/SiC composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(2), 433–439.
- Liu, Y., Chen, K., Dong, F., Peng, S., Cui, Y., Zhang, C., Zhang, H. (2018). Effects of hydrolysis of precursor on the structures and properties of polymer-derived SiBN ceramic fibers. *Ceramics International*, 44(9), 10199–10203.
- Liu, Z., Picken, S. J., & Besseling, N. A. (2014). Polyborosiloxanes (PBSs), Synthetic Kinetics, and Characterization. *Macromolecules*, 47(14), 4531–4537.
- Lodhe, M., Babu, N., Selvam, A., & Balasubramanian, M. (2015). Synthesis and characterization of high ceramic yield polycarbosilane precursor for SiC. *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4), 307–311. <https://doi.org/10.1007/s40145-015-0165-x>
- Mera, G., Gallei, M., Bernard, S., & Ionescu, E. (2015). Ceramic Nanocomposites from Tailor-Made Praceramic Polymers. *Nanomaterials*, 5, 468–540.
- Nagaiah, N., Kapat, J., An, L., & Chow, L. (2006). Novel Polymer Derived Ceramic-High Temperature Heat Flux Sensor for Gas Turbine Environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 34, 458–463.
- Packirisamy, S., Sreejith, K. J., Devapal, D., & Swaminathan, B. (2020). Polymer-Derived Ceramics and Their Space Applications. In *Handbook of Advanced Ceramics and Composites* (pp. 1–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73255-8_31-2
- Ren, Z., Mujib, S. B., & Singh, G. (2021). High-temperature properties and applications of Si-based polymer-derived ceramics: A review. *Materials*, 14(3), 641.
- Riedel, R., Mera, G., Hauser, R., & Klonszcztnksi, A. (2006). Silicon-Based Polymer-Derived Ceramics: Synthesis Properties and Applications-A Review. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 114(1330), 425–444. <https://doi.org/10.2109/jcersj.114.425>
- Ryu, H.-Y., Wang, Q., & Raj, R. (2010). Ultrahigh-Temperature Semiconductors Made from Polymer-Derived Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(6), 1668–1676.
- Sacarescu, L. (2009). Polycarbosiloxane Networks. *Materiale Plastice*, 46(1), 43–47.
- Sarraf, F., Churakov, S. V., & Clemens, F. (2023). Praceramic polymers for additive manufacturing of silicate ceramics. *Polymers*, 15(22).
- Schulz, M., Borner, M., Gottert, J., Hanemann, T., Haubelt, J., & Motz, G. (2004). Cross linking behavior of praceramic polymers effected by UV- and synchrotron radiation. *Advanced Engineering Materials*, 6(8), 676–680.
- Seo, D., Jung, S., Lombardo, S., Feng, Z., Chen, J., & Zhang, Y. (2011). Fabrication and electrical properties of polymer-derived ceramic (PDC) thin films for high-temperature heat fluc sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 165(2), 250–255.
- Shao, G., Jiang, J., Jiang, M., Su, J., Liu, W., Wang, H., Zhang, R. (2020). Polymer-derived SiBCN ceramic pressure sensor with excellent sensing performance. *Journal of Advanced Ceramics*, 9(3), 374–379.
- Terauds, K., Sanchez-Jimenez, P., Raj, R., Vakifahmetoglu, C., & Colombo, P. (2010). Giant piezoresistivity of polymer-derived ceramics at high temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 2203–2207.

- Tite, M. S. (2008). CERAMIC PRODUCTION, PROVENANCE AND USE—A REVIEW*. *Archaeometry*, 50(2), 216–231. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00391.x>
- Wang, G., & Song, Y. (2018). Enhancing the yield of polycarbosilane synthesis via recycling of liquid by-product at atmospheric pressure. *Ceramics International*, 44(6), 6474–6478. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.045>
- Widgeon, S., Mera, G., Gao, Y., Sen, S., Navrotsky, A., & Riedel, R. (2013). Effect of Precursor on Speciation and Nanostructure of SiBCN Polymer-Derived Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(5), 1651–1659.
- Wu, N., Wan, Y., Wang, Y., & Ko, F. (2017). Conversion of hydrophilic SiOC nanofibrous membrane to robust hydrophobic materials by introducing palladium. *Applied Surface Science*, 425, 750–757.
- Xie, S., Wang, Y., Lei, Y., Wang, B., Wu, N., Gou, Y., & Fang, D. (2015). A simply prepared flexible SiBOC ultrafine fiber mat with enhanced high-temperature stability and chemical resistance. *RSC Advanced*, 5(80), 64911–64917.
- Yang, N., Xu, S., Zhang, D., & Xu, C. (2023). Super-Wideband Electromagnetic Absorbing TiC/SiOC Ceramic/Glass Composites Derived from Polysiloxane and Titanium Isopropoxide with Low Thickness (<1 mm). *Advanced Engineering Materials*, 25(9). <https://doi.org/10.1002/adem.202201508>
- Yu, Y., & Liu, Y. (2020). A large-pressure-range, large-sensing-distance wireless passive pressure sensor based on polymer infiltration pyrolysis-enhanced polymer-derived ceramic films. *Measurement Science and Technology*, 31(7), 075103.
- Yu, Y., Huang, Q., Rhodes, S., Fang, J., & An, L. (2017). SiCNO-GO composites with the negative temperature coefficient of resistance for high-temperature sensor applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(2), 592–601.
- Zhang, C., Liu, Y., Cui, Y., Chen, K., Peng, S., Zhang, H., Yu, M. (2018). Comparison of effects of nitrogen sources on the structures and properties of SiBNC ceramic fiber precursors. *Ceramic International*, 44(12), 14878–14883.
- Zhang, H., Xue, L., Li, J., & Ma, Q. (2020). Hyperbranched Polycarbosiloxanes: Synthesis by Piers-Rubinsztajn Reaction and Application as Precursors to Magnetoceramics. *Polymers*, 12(3), 672. <https://doi.org/10.3390/polym12030672>
- Alvi, S. A., & Akhtar, F. (2018). High temperature tribology of polymer derived ceramic composite coatings. *Scientific reports*, 8(1), 15105.
- Barroso, G., Li, Q., Bordia, R. K., & Motz, G. (2018). Polymeric and Ceramic silicon-based coatings - a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(5), 1936–1963.
- Biesuz, M., Zera, E., Tomasi, M., Jana, P., Ersen, O., Baaziz, W., Sorarù, G. (2020). Polymer-derived Si₃N₄ nanofelts for flexible, high temperature, lightweight and easy-manufacturable super-thermal insulators. *Applied Materials Today*, 20, 100648.
- Chaudhary, R. P., Parameswaran, C., Idrees, M., Rasaki, A. S., Liu, C., & Chen, Z. (2022, July). Additive Manufacturing of Polymer-Derived Ceramics: Materials, Technologies, Properties and Potential Applications. *Progress in Materials Science*, 128.
- Chen, J., He, G., Liao, Z., & Zeng, B. (2008). Control of structure formation of polycarbosilane synthesized from polydimethylsilane by Kumada rearrangement. *Journal of Applied Polymer Science*, 108(5), 3114–3121.
- Colombo, P., Mera, G., Riedel, R., & Soraru, G. D. (2010). Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics. *Journal of The American Ceramic Society*, 93(7), 1805–1837.
- Cramer, C. L., Armstrong, H., Betancourt, A. F., Han, L., Elliot, A. M., Curzio, E. L., Nawaz, K. (2020). Processing and properties of SiC composites made via binder jet 3D printing and infiltration and pyrolysis of preceramic polymer. *Ceramic Engineering & Science*, 320–331. doi:10.1002/ces2.10070
- Dongoran, J. et al. (2021) 'Perkembangan Zeolit Sebagai Katalis Alam Potensial', *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 3(2), pp. 28–39.
- Drozдов, F. V., Milenin, S. A., Gorodov, V. V., Demchenko, N. V., Buzin, M. I., & Muzafarov, A. M. (2019). Crosslinked polymers based on polyborosiloxanes: Synthesis and properties. *Journal of Organometallic Chemistry*, 72–77.
- Eick, B. M., & Youngblood, J. P. (2009). SiC nanofibers by pyrolysis of electrospun praceramic polymers. *Journal of Materials Science*, 44, 160–165.
- Flores, O., Schmalz, T., Krenkel, W., Heymann, L., & Motz, G. (2013). Selective cross-linking of oligosilazanes to tailored meltable polysilazanes for the processing of ceramic SiCN fibres. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(48), 15406.
- Fu, S., Zhu, M., & Zhu, Y. (2019). Organosilicon polymer-derived ceramic: An overview. *Journal of Advanced Ceramics*, 8(4), 457–478.

- Garinas, W. (2009). Karakteristik Bahan Baku Kaolin Untuk Bahan Pembuatan Badan Isolator Listrik Keramik Porselen Fuse Cut Out (fco). *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 11(2).
- Grossenbacher, J., Gullo, M., Bakumov, V., Blugan, G., Kuebler, J., & Brugger, J. (2015). On the micrometre precise mould filling of liquid polymer derived ceramic precursor for 300-mm-thick high aspect ratio ceramic MEMS. *Ceramics International*, 41(1), 623-629.
- Gunes, D., & Karagoz, B. (2022). Synthesis of Core-Shell Polyborosiloxanes as a Heat-Resistant Platform. *ACS Omega*, 43877-43882.
- Hackbarth, H. G., Key, T. S., Ackley, B. J., Opletal, G., Rawal, A., Gallington, L., Bedford, N. M. (2023). Uncovering atomic-scale polymer-to-ceramic transformations in SiC polymer derived ceramics from polycarbosilanes. *Journal of the European Ceramic Society*.
- Harshe, R., Balan, C., & Riedel, R. (2004). Amorphous Si(Al)OC ceramic from polysiloxanes: Bulk ceramic processing, crystallization behavior and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 3471-3482.
- Hauser, R., Nahar-Borchard, S., Riedel, R., Ikuhara, Y. H., & Iwamoto, Y. (2006). Polymer-Derived SiBCN Ceramic and their Potential Application for High Temperature Membranes. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 114(1330), 524-528.
- He, L., Zhang, Z., Yang, X., Jiao, L., Li, Y., & Xu, C. (2015). Liquid polycarbosilanes: Synthesis and evaluation as precursors for SiC ceramic. *Polymer International*, 64(8), 979-985.
- Horz, M., Zern, A., Berger, F., & Haug, J. (2005). Novel Polysilazanes as Precursors for Silicon Nitride/Silicon Carbide Composites Without "Free Carbon. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(2), 99-110.
- Hu, L.-H., & Raj, R. (2015). Semiconductive Behavior of Polymer-Derived SiCN Ceramics for Hydrogen Sensing. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(4), 1052-1055.
- Ionescu, E., Kleebe, H.-J., & Riedel, R. (2012). Silicon-containing polymer-derived ceramic nanocomposites (PDC-NCs): preparative approaches and properties. *Chemical Society Reviews*, 41(15), 5032-5052.
- Iwamoto, Y., Volger, W., Kroke, E., Riedel, R., Saitou, T., & Matsunaga, K. (2004). Crystallization Behavior of Amorphous Silicon Carbonitride Ceramics Derived from Organometallic Precursors. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(10), 2170-2178.
- Janakiraman, N., & Aldinger, F. (2009). Fabrication and characterization of fully dense Si-C-N ceramics from a poly(ureamethylvinyl)silazane precursor. *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 163-173.
- Ji, X., Wang, S., Shao, C., & Wang, H. (2018). High-Temperature Corrosion Behavior of SiBCN Fibers for Aerospace Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(23), 19712-19720.
- Jia, Y., Ajayi, T., Roberts, M. J., Chung, C.-C., & Xu, C. (2020). Ultrahigh-Temperature Ceramic-Polymer-Derived SiOC Ceramic Composites for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(41), 46254-46266.
- Klausmann, A., Morita, K., Johannis, K. E., Fasel, C., Durst, K., Mera, G., & Ionescu, E. (2015). Synthesis and high-temperature evolution of polysilylcarbodiimide-derived SiCN ceramic coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(14), 3771-3780.
- Kong, J., Maute, K., Frangopol, D., Liew, L.-A., Saravanan, R., & Raj, R. (2003). A real time human-machine interface for an ultrahigh temperature MEMS sensor-igniter. *Sensors and Actuators A: Physical*, 105(1), 23-30.
- Lee, J., Butt, D. P., Baney, R. H., Bowers, C. R., & Tulenko, J. S. (2005). Synthesis and pyrolysis of novel polysilazane to SiBCN ceramic. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2995-3005.
- Li, N., Cao, Y., Zhao, R., Xu, Y., & An, L. (2017). Polymer-derived SiAlOC ceramic pressure sensor with potential for high-temperature application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 174-178.
- Li, P., Jin, H., Wei, S., Liu, H., Gao, N., & Shi, Z. (2020). Ceramization Mechanism of Ceramizable Silicone Rubber Composites with Nano Silica at Low Temperature. *Materials*, 13(3708), 1-12. doi:10.3390/ma13173708
- Liu, J., Zhang, L., Hu, F., Yang, J., Cheng, L., & Wang, Y. (2013). Polymer-derived yttrium silicate coatings on 2D C/SiC composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(2), 433-439.
- Liu, Y., Chen, K., Dong, F., Peng, S., Cui, Y., Zhang, C., Zhang, H. (2018). Effects of hydrolysis of precursor on the structures and properties of polymer-derived SiBN ceramic fibers. *Ceramics International*, 44(9), 10199-10203.
- Liu, Z., Picken, S. J., & Besseling, N. A. (2014). Polyborosiloxanes (PBSs), Synthetic Kinetics, and Characterization. *Macromolecules*, 47(14), 4531-4537.

- Lodhe, M., Babu, N., Selvam, A., & Balasubramanian, M. (2015). Synthesis and characterization of high ceramic yield polycarbosilane precursor for SiC. *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4), 307-311.
- Mera, G., Gallei, M., Bernard, S., & Ionescu, E. (2015). Ceramic Nanocomposites from Tailor-Made Praceramic Polymers. *Nanomaterials*, 5, 468-540.
- Nagaiah, N., Kapat, J., An, L., & Chow, L. (2006). Novel Polymer Derived Ceramic-High Temperature Heat Flux Sensor for Gas Turbine Environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 34, 458-463.
- Nurhakim. (2005). *Bahan Galian Terkait Industri Keramik*.
- Ren, Z., Mujib, S. B., & Singh, G. (2021). High-temperature properties and applications of Si-based polymer-derived ceramics: A review. *Materials*, 14(3), 641.
- Riedel, R., Mera, G., Hauser, R., & Klonczynski, A. (2006). Silicon-Based Polymer-Derived Ceramics: Synthesis Properties and Application - A Review. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 114(6), 425-444.
- Ryu, H.-Y., Wang, Q., & Raj, R. (2010). Ultrahigh-Temperature Semiconductors Made from Polymer-Derived Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(6), 1668-1676.
- Sacarescu, L. (2009). Polycarbosiloxane Networks. *Materiale Plastice*, 43-47.
- Sarraf, F., Churakov, S. V., & Clemens, F. (2023). Praceramic polymers for additive manufacturing of silicate ceramics. *Polymers*, 15(22).
- Schulz, M., Borner, M., Gottert, J., Hanemann, T., Haubelt, J., & Motz, G. (2004). Cross linking behavior of praceramic polymers effected by UV- and synchrotron radiation. *Advanced Engineering Materials*, 6(8), 676-680.
- Seo, D., Jung, S., Lombardo, S., Feng, Z., Chen, J., & Zhang, Y. (2011). Fabrication and electrical properties of polymer-derived ceramic (PDC) thin films for high-temperature heat flux sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 165(2), 250-255.
- Shao, G., Jiang, J., Jiang, M., Su, J., Liu, W., Wang, H., Zhang, R. (2020). Polymer-derived SiBCN ceramic pressure sensor with excellent sensing performance. *Journal of Advanced Ceramics*, 9(3), 374-379.
- Terauds, K., Sanchez-Jimenez, P., Raj, R., Vakifahmetoglu, C., & Colombo, P. (2010). Giant piezoresistivity of polymer-derived ceramics at high temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 2203-2207.
- Tite, M. S. (2008). Ceramic Production, Provenance and Use - A Review. *Archaeometry*, 50(2), 216-231.
- Wang, G., & Song, Y. (2018). Enhancing the Yield of Polycarbosilane Synthesis via Recycling of Liquid By-product at Atmospheric Pressure. *Ceramics International*, 44(6), 1188-1194.
- Widgeon, S., Mera, G., Gao, Y., Sen, S., Navrotsky, A., & Riedel, R. (2013). Effect of Precursor on Speciation and Nanostructure of SiBCN Polymer-Derived Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(5), 1651-1659.
- Wu, N., Wan, Y., Wang, Y., & Ko, F. (2017). Conversion of hydrophilic SiOC nanofibrous membrane to robust hydrophobic materials by introducing palladium. *Applied Surface Science*, 425, 750-757.
- Xie, S., Wang, Y., Lei, Y., Wang, B., Wu, N., Gou, Y., & Fang, D. (2015). A simply prepared flexible SiBOC ultrafine fiber mat with enhanced high-temperature stability and chemical resistance. *RSC Advanced*, 5(80), 64911-64917.
- Yang, N., Xu, S., Zhang, D., & Xu, C. (2023). Super-Wideband Electromagnetic Absorbing TiC/SiOC Ceramic/Glass Composites Derived from Polysiloxane and Titanium Isopropoxide with Low Thickness (<1 mm). *Advanced Engineering Materials*.
- Yu, Y., & Liu, Y. (2020). A large-pressure-range, large-sensing-distance wireless passive pressure sensor based on polymer infiltration pyrolysis-enhanced polymer-derived ceramic films. *Measurement Science and Technology*, 31(7), 075103.
- Yu, Y., Huang, Q., Rhodes, S., Fang, J., & An, L. (2017). SiCNO-GO composites with the negative temperature coefficient of resistance for high-temperature sensor applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(2), 592-601.
- Zhang, C., Liu, Y., Cui, Y., Chen, K., Peng, S., Zhang, H., Yu, M. (2018). Comparison of effects of nitrogen sources on the structures and properties of SiBNC ceramic fiber precursors. *Ceramic International*, 44(12), 14878-14883.
- Zhang, H., Xue, L., Li, J., & Qingyu, M. (2020). Hyperbranched Polycarbosiloxanes: Synthesis by Piers-Rubinsztajn Reaction and Application as Precursors to Magnetoceramics. *Polymers*.

- Zhang, Q., Yang, Z., Jia, D., Chen, Q., & Zhou, Y. (2016). Synthesis and structural evolution of dual-boron-source-modified polysilazane derived SiBCN ceramics. *New Journal of Chemistry*, 40(8), 7034-7042.
- Zhang, Z., Zeng, F., Han, J., Luo, Y., & Xu, C. (2011). Synthesis and characterization of a new liquid polymer precursor for Si-B-C-N ceramics. *Journal of Materials Science*, 5940-5947.
- Zhao, R., Shao, G., Cao, Y., An, L., & Xu, C. (2014). Temperature sensor made of polymer-derived ceramics for high temperature applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 219, 58-64.