



PERHITUNGAN KAJIAN KOMPUTASI INTERAKSI ANTARA POLISTIRENA (PS) DENGAN POLIKAPROLAKTON (PCL)

Nur Anisa Anggita, Universitas Negeri Medan, Indonesia
Muhammad Yusuf*, Universitas Negeri Medan, Indonesia
Floren Miani Sihotang, Universitas Negeri Medan, Indonesia
Dilla Rama Dina, Universitas Negeri Medan, Indonesia
Andhika Febrian Pulungan, Universitas Negeri Medan, Indonesia
Meygrees Swimayu Panggabean, Universitas Negeri Medan, Indonesia
Giovani Mei Anggasta Telaumbanua, Universitas Negeri Medan, Indonesia

ABSTRACT

This study explores the molecular interaction between polystyrene (PS) and polycaprolactone (PCL) using a computational approach based on the Complete Neglect of Differential Overlap (CNDO) method. Structural optimization and quantum chemical calculations were conducted to evaluate interatomic distances, partial atomic charges, and interaction energies. The simulation results reveal the presence of hydrogen bonding between hydrogen atoms from PS and oxygen atoms from PCL, with bond distances measured at 2.8 Å and 2.2 Å. These bonds are accompanied by significant charge differences, indicating strong non-covalent interactions. The total interaction energy obtained was -16084 kcal/mol, suggesting that the PS-PCL complex is thermodynamically stable. These results demonstrate the compatibility of PS and PCL as a polyblend system and provide computational evidence for their potential in the development of environmentally friendly polymer-based materials.

ARTICLE HISTORY

Submitted 06/03/2026
Revised 19/05/2026
Accepted 04/06/2026

KEYWORDS

Polystyrene, Poly(ϵ -caprolactone), CNDO, Interaction energy, Computational study

*CORRESPONDENCE AUTHOR

✉ myusuf@unimed.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.30743/cheds.v10i1.13191>

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan komputer memberikan cara yang efisien dan akurat dalam memecahkan permasalahan di bidang kimia mencakup struktur, sifat, interaksi, reaktivitas molekuler. Metode ini tidak hanya mengurangi biaya dan waktu yang diperlukan dalam eksperimen komputer, tetapi juga serta memungkinkan analisis interaksi molekuler yang berhubungan dengan sistem makroskopis dengan tingkat presisi tinggi. Kimia komputasi adalah bagian dari ilmu kimia yang menggunakan prinsip-prinsip fisika kuantum, matematika, dan algoritma komputer untuk secara teori mempelajari struktur, sifat, reaktivitas, dan interaksi molekuler. Pendekatan ini memberikan gambaran atom yang sulit dilihat langsung melalui metode eksperimen (Paramita et al., 2020; Pranowo & Hetadi, 2011). Selain itu, pendekatan ini memungkinkan perhitungan berbagai sifat molekuler yang kompleks dengan hasil yang mendekati akurasi eksperimen laboratorium (Yusuf, 2017). Dalam studi interaksi molekuler, kimia komputasi sering dipakai untuk melihat sebaran muatan, total energi sistem, panjang ikatan, dan stabilitas molekuler. Ini bisa memberikan informasi awal tentang kemungkinan terjadinya interaksi antara molekuler.

Salah satu cara yang sering dipakai dalam kimia komputasi adalah metode semiempiris. Metode semiempiris adalah cara dalam perhitungan kimia kuantum yang membuat beberapa perhitungan integral elektron lebih sederhana dengan menambahkan parameter yang didapat dari pengalaman. Dengan cara ini, metode ini bisa memberikan hasil yang cukup baik dalam waktu komputasi yang lebih singkat dibandingkan dengan metode *ab initio* atau teori fungsional kerapatan (DFT) (Prianto, 2007). Salah satu cara semiempiris yang digunakan untuk mempelajari interaksi antara molekuler adalah *Complete Neglect of Differential Overlap* (CNDO). Metode ini dipilih karena dapat memberikan perkiraan energi, distribusi muatan atom, dan interaksi antara molekuler dengan efisiensi komputasi yang baik. Ini terutama berlaku untuk sistem molekuler yang berukuran menengah hingga besar, seperti polimer (Pranowo & Hetadi, 2011).

Polistirena (PS) merupakan bahan polimer yang banyak digunakan sebagai bahan kemasan dan peralatan rumah tangga. Namun, PS tidak mudah terurai sehingga menimbulkan kerusakan lingkungan. Sebaliknya, polikaprolakton (PCL) adalah polimer yang memiliki sifat mekanik yang baik, *biodegradable*, tidak beracun, namun memiliki titik leleh



yang rendah. Pada penelitian sebelumnya, Yusuf & Rahmah (2023) telah dilakukan penggabungan PS dan PCL agar menghasilkan *poliblend* yang lebih mudah terurai di alam. Pencampuran ini dilakukan untuk melengkapi kekurangan polimer, menghasilkan *poliblend* yang kuat, memiliki titik leleh yang tinggi dan bersifat biokompatibel. Hasil yang diperoleh berupa pergeseran titik leleh campuran poli PS/PCL dibandingkan dengan PS dan PCL murni. Oleh karenanya, hasil studi komputasi analisis terhadap interaksi molekuler antara PS dengan PCL sangat relevan dilakukan untuk merumuskan dan memperkirakan bagaimana kedua polimer ini dapat dicampur secara optimal dan membantu peneliti pada rancangan awal penelitian di laboratorium (Yusuf & Utama, 2023).

Penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Yusuf dan Utama, (2023) menunjukkan bahwa mencampurkan PS dengan PCL dapat mengubah sifat termal dan mekanik pada sistem *poliblend*. Namun, penelitian ini masih lebih mengutamakan karakterisasi eksperimental yang terlihat secara keseluruhan, sementara studi tentang interaksi molekuler antara PS dan PCL dengan cara komputasi belum banyak dilaporkan. Hingga sekarang, sifat interaksi antar atom, penyebaran muatan lokal, jarak interaksi antar atom, serta energi interaksi antara PS dan PCL di tingkat molekuler masih belum dipahami dengan jelas. Sebenarnya, informasi ini sangat penting untuk memahami bagaimana sistem *poliblend* dapat bekerja bersama sejak awal, serta untuk memprediksi seberapa stabil interaksi antar molekul sebelum kita melakukan percobaan sintesis.

Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukan studi penelitian komputasi untuk menghitung interaksi antara polistirena (PS) dengan polikaprolakton (PCL), dengan mengetahui energi interaksi yang dihitung menggunakan metode semi empiris CNDO.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kimia komputasi kuantitatif dengan metode semiempiris CNDO (*Complete Neglect of Differential Overlap*) untuk melihat bagaimana molekul polistirena (PS) berinteraksi dengan poli(ϵ -kaprolakton) (PCL). Analisis dilakukan dengan cara teoritis melalui pengoptimalan struktur dan perhitungan parameter kimia kuantum. Tujuannya adalah untuk mendapatkan informasi tentang sebaran muatan atom, jarak interaksi antar molekul, dan energi interaksi yang terjadi pada sistem dimer PS-PCL.

2.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laboratorium kimia Universitas Negeri Medan, Sumatera Utara. Penelitian ini dimulai pada bulan Mei 2025.

2.3 Target/Subjek Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada sistem dimer yang terdiri dari polistirena (PS) dan poli(ϵ -kaprolakton) (PCL) yang telah dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak *HyperChem* 8.0 secara komputasi. Fokus analisis dalam penelitian ini mencakup interaksi antara molekul, distribusi muatan atom, jarak antar atom, serta energi interaksi dalam sistem untuk menilai kestabilan dan sifat dari interaksi non-kovalen yang terjadi.

2.4 Prosedur

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan kimia komputasi untuk mengkaji interaksi antara Polistirena (PS) dengan Polikaprolakton (PCL). Prosedur penelitian dilakukan secara komputasi menggunakan metode semi-empiris CNDO dengan tahapan sebagai berikut:

2.4.1 Pembuatan Model Struktur Molekul

Tahap awal dimulai dengan penggambaran struktur molekul polistirena (PS) dan poli(ϵ -kaprolakton) (PCL) dibuat dengan menggunakan fitur *Model Builder* yang ada di perangkat lunak *HyperChem* 8.0. Kedua molekul itu kemudian diatur dalam beberapa konformasi awal dengan posisi yang memungkinkan terjadinya interaksi antara gugus aktif, terutama antara atom hidrogen dari PS dan atom oksigen pada kelompok karbonil serta kelompok oksigen ester pada PCL.

2.4.2 Pengaturan Posisi dan Jarak Molekul

Jarak antara atom H dari gugus hidroksi dengan atom O karbonil diatur sedemikian rupa sehingga atom-atom yang berpotensi berinteraksi diletakkan pada jarak awal yang cukup dekat (sekitar 2 Å) untuk memungkinkan terjadinya interaksi non-kovalen setelah optimasi geometri. Pengaturan ini dilakukan untuk memperoleh orientasi awal yang representatif dalam interaksi antarmolekul.

2.4.3 Optimasi struktur

Optimasi struktur dilakukan dengan menggunakan metode semiempiris (*semi-empirical*) CNDO pada menu Setup, lalu optimasi struktur dimer polistirena. Proses optimasi geometri dilakukan untuk memperoleh konfigurasi molekul yang paling stabil secara termodinamika, sehingga parameter interaksi yang dihitung merepresentasikan keadaan sistem yang optimum.

2.4.4 Verifikasi Ikatan Hidrogen

Untuk melihat apakah struktur dimer teroptimasi dapat melakukan ikatan hidrogen, pilih *recompute H bond* pada menu *Display*. Ikatan hidrogen akan ditandai dengan garis putus-putus pada atom H dari gugus hidroksil dengan atom O karbonil.

2.4.5 Perhitungan Energi Interaksi

Energi interaksi dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta E = E_{\text{Poliben}} - (E_{\text{PS}} + E_{\text{PCL}})$$

Keterangan:

E_{Poliben} = energi hasil optimasi dimer Polistirena

E_{PS} = energi monomer polistirena

E_{PCL} = energi monomer polikaprolakton

Adapun data yang akan diperoleh berupa nilai energi interaksi dan data yang diperoleh berupa jarak antar atom serta muatan atomnya (Rahmawati et al., 2019).

2.5 Data, Instrumen, dan Teknik Pengumpulan Data

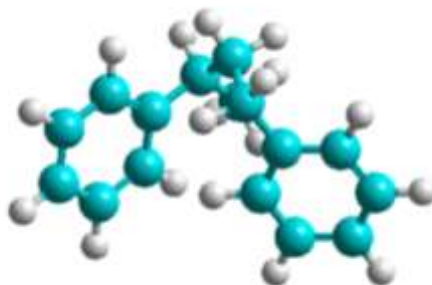
Data yang diperoleh dalam penelitian ini mencakup muatan atom, panjang ikatan antar atom, serta energi total hasil interaksi Polistirena (PS) dan Polikaprolakton (PCL). Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak *HyperChem* 8.0 sebagai alat pemodelan molekul dan perhitungan semi empiris, komputer sebagai perangkat komputasi untuk menjalankan percobaan. Sedangkan untuk pengumpulan data dilakukan dengan mencatat hasil perhitungan parameter kimia kuantum yang diperoleh dari optimasi struktur.

2.6 Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara kuantitatif-deskriptif dengan membandingkan hasil distribusi muatan atom, panjang interaksi antar atom, dan energi interaksi sistem. Interpretasi dilakukan untuk mengidentifikasi kemungkinan terbentuknya interaksi non-kovalen berdasarkan parameter yang diperoleh, serta mengevaluasi kestabilan sistem dimer PS-PCL melalui nilai energi interaksi.

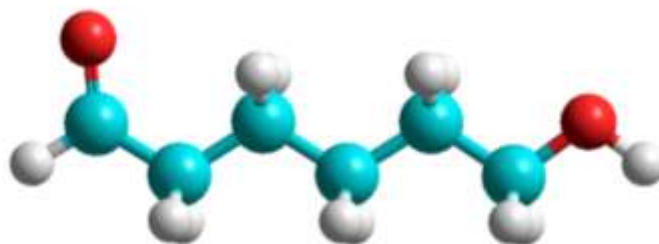
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur molekul Polistirena pada Gambar 1. dan struktur molekul Polikaprolakton pada Gambar 2. Dibuat dengan model *builder* yaitu *Hyperchem*.



Gambar 1: Struktur dimer Polistirena

Optimasi geometri dilakukan menggunakan metode semiempiris CNDO hingga diperoleh bentuk yang paling stabil dengan energi minimum.



Gambar 2: Struktur dimer Polikaprolakton

Visualisasi hasil optimasi dari interaksi dimer PS-PCL menunjukkan kedekatan antara atom oksigen dari gugus hidroksi dan karbonil PCL dengan atom hidrogen dari PS. Kedekatan antar molekul ini mengindikasikan adanya potensi interaksi antarmolekul non kovalen yang dipengaruhi oleh distribusi muatan lokal dan orientasi spasial antar molekul. Menurut Sarasam et al. (2006), interaksi tersebut mendukung kemungkinan terbentuknya sistem *poliblend* yang lebih stabil karena PCL dapat berperan sebagai komponen pencampur yang mempengaruhi sifat fisikokimia material polimer. Interaksi antara dimer PS-PCL menghasilkan sistem *poliblend* yang lebih kompatibel dan fleksibel dibandingkan dengan polimer murni. Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik antarmolekul yang menjaga stabilitas antar rantai polimer. Dalam konteks PS, perubahan atau modifikasi struktur polistirena dapat memengaruhi sifat material karena struktur rantai polimernya dapat mengalami penyesuaian melalui interaksi atau perlakuan kimia tertentu (Humaira et al., 2022).

Hasil perhitungan muatan atom sebelum dan sesudah interaksi menunjukkan adanya redistribusi elektron. Atom H_1 pada PS menunjukkan muatan -0.055 , sedangkan O_1 dari gugus hidroksi PCL 0.325 . Begitu juga dengan pasangan H_2 -0.026 dan O_2 dari karbonil PCL 0.364 . Perbedaan muatan ini menghasilkan Δ Muatan sebesar 0.27 dan 0.338 secara berturut-turut. Data yang diambil terdapat pada Tabel 1.

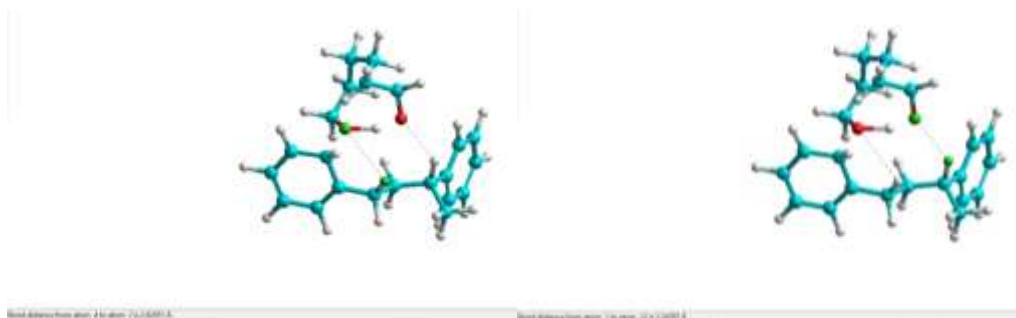
Tabel 1: Jarak dan energi interaksi dari PS dengan PCL

<i>Poliblend</i>	R_1 (Å)	<i>Charge</i> H_1	<i>Charge</i> O_1	<i>Delta Charge</i> H_1-O_1	R_2 (Å)	<i>Charge</i> H_2	<i>Charge</i> O_2	<i>Delta Charge</i> H_2-O_2	Energi (kcal/mol)
PS/PCL	2.8	0.055	0.325	0.27	2.2	0.026	0.364	0.338	-16084

Perubahan muatan ini mengindikasikan adanya tarikan elektrostatik antara pasangan atom. Menurut Vinsiah & Fadhillah, (2018), perubahan muatan lokal menunjukkan terbentuknya gaya tarik non kovalen seperti ikatan hidrogen lemah atau interaksi elektrostatik, terutama apabila adanya jarak antar atom yang berada pada rentang interaksi antar molekul.

3.1 Panjang Ikatan dan Jenis Interaksi

Jarak antara H_1 dan O_1 sebesar 2.8 \AA sedangkan jarak H_2 dan O_2 sebesar 2.2 \AA . panjang interaksi ini termasuk dalam kisaran interaksi lemah non-kovalen ($2.3-3.0 \text{ \AA}$). Rentang jarak ini menunjukkan bahwa tidak terjadi pembentukan ikatan kovalen baru, melainkan terbentuknya interaksi antarmolekul yang berada pada rentang interaksi non kovalen. Jarak 2.8 \AA menunjukkan interaksi lemah yang berada dalam rentang interaksi elektrostatik atau ikatan hidrogen lemah. Sedangkan jarak 2.2 \AA menunjukkan adanya kedekatan atom yang lebih tinggi sehingga interaksi yang terbentuk cenderung lebih kuat dibandingkan dengan pasangan atom pertama. Hal ini dapat dilihat pada nilai Δ *charge* pasangan H_2-O_2 yang lebih besar dibandingkan dengan pasangan H_1-O_1 . Jarak antar atom dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3: Jarak antar atom pada struktur PS-PCL

Panjang jarak ini menandakan tidak terbentuknya ikatan kovalen baru, melainkan interaksi fisik yang bersifat tarik menarik. Berdasarkan data panjang ikatan, distribusi muatan, dan tidak adanya ikatan baru yang terbentuk, interaksi

yang terjadi antara PS-PCL didominasi oleh gaya non kovalen berupa interaksi elektrostatik dengan kemungkinan ikatan hidrogen lemah, bukan pembentukan ikatan baru. Menurut Saputra et al, (2013) menyatakan bahwa sistem dengan energi negatif namun juga tidak menunjukkan pembentukan ikatan kovalen dapat diklasifikasikan sebagai interaksi *van der Waals*.

3.2 Energi Interaksi

Energi total sistem PS-PCL hasil optimasi adalah -16084 kcal/mol, sedangkan total energi monomer PS dan PCL dalam keadaan bebas lebih tinggi. Perhitungan energi interaksi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta E = E_{\text{Poliblen}} - (E_{\text{PS}} + E_{\text{PCL}}) &= -16084 - (-10961 + (-5016)) \\ &= -107 \text{ kcal/mol} \times 4.18 \\ &= -447.26 \text{ kJ/mol}\end{aligned}$$

Data ini menunjukkan bahwa pembentukan kompleks terjadi secara spontan dan stabil secara termodinamika. Interaksi antara dimer PS-PCL ini menghasilkan sistem *poliblen* yang lebih kompatibel dan fleksibel dibandingkan dengan polimer murni itu sendiri. Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik antarmolekul yang menjaga stabilitas antar rantai polimer. Menurut Yusuf et al., (2022) dalam penelitiannya terhadap PCL-PP yang menunjukkan bahwa campuran *poliblen* semacam ini akan meningkatkan kekuatan tarik dan kelenturan dibandingkan polimer murni. Besarnya energi interaksi ini juga menunjukkan bahwa pendekatan molekul PS dan PCL menghasilkan konfigurasi yang lebih rendah energinya setelah optimasi, yang menandakan adanya kompatibilitas interaksi pada tingkat molekuler. Namun, hasil ini hanya menggambarkan kestabilan interaksi secara teoritis pada tingkat molekuler dan tidak secara langsung menunjukkan perubahan sifat mekanik material secara makroskopik, sehingga interpretasi terhadap sifat material tetap memerlukan data eksperimental tambahan.

Muatan atom H dan O cenderung lebih netral dan jarak antar atom lebih acak pada monomer. Setelah interaksi, muatan menjadi lebih ekstrem dan jarak antar atom menjadi lebih spesifik pada dimer. Panjang ikatan H₁-O₁ dan H₂-O₂ juga sedikit berbeda karena perbedaan ukuran molekul dan distribusi muatan lokal. Selain itu, perubahan distribusi muatan setelah interaksi menunjukkan adanya penyesuaian kerapatan lokal pada atom-atom yang saling berdekatan. Hal ini umum ditemukan dalam sistem molekuler yang mengalami interaksi non kovalen, dimana redistribusi muatan berkontribusi terhadap kestabilan energi sistem secara keseluruhan.

4. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Interaksi antara polistirena (PS) dan poli(ε-kaprolakton) (PCL) menunjukkan interaksi non-kovalen yang didominasi oleh gaya elektrostatik dengan kontribusi ikatan hidrogen yang lemah, seperti yang ditunjukkan oleh panjang interaksi atom H₁-O₁ sebesar 2,8 Å dan panjang interaksi atom H₂-O₂ sebesar 2,2 Å, masing-masing. Perbedaan distribusi muatan atom pada pasangan interaksi menghasilkan Δ charge sebesar 0,27 dan 0,338, yang menunjukkan adanya gaya tarik antar molekul. Dengan nilai energi interaksi -107 kcal/mol atau -447.26 kJ/mol, pembentukan sistem dimer PS-PCL lebih stabil secara energetik dibandingkan dengan keadaan monomer bebas. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem PS-PCL memiliki kecenderungan untuk berkolaborasi dengan interaksi molekuler, yang dapat membantu sistem *poliblen* tetap stabil pada tingkat molekuler.

4.2 Saran

Untuk mendapatkan gambaran interaksi yang lebih komprehensif, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan model polimer rantai yang lebih panjang atau metode simulasi komputasi lainnya, seperti *molecular dynamics* atau metode kuantum dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Untuk mengevaluasi hubungan antara interaksi molekuler dan sifat material makroskopik, data eksperimen juga harus mendukung temuan kajian komputasi ini.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM UNIMED yang telah membantu dana penelitian ini melalui Hibah *Student Grant* dengan No. Kontrak 0133/UN33.8/PPKM/PSG/2025. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kemendikbudristek RI untuk pendanaan penelitian ini, yang berasal dari Dana PNBPN Universitas Negeri Medan Tahun Anggaran 2025 sesuai dengan Surat Keputusan Rektor Universitas Negeri Medan Nomor: 0194/UN33/KPT/2025.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Humaira, T., Kurniawan, B., Hasanah, S., Christina, E., & At-Tsaqib, J. H. (2022). Modifikasi struktur polistirena menggunakan maleat anhidrida sebagai pengikat silang dan benzoil peroksida sebagai inisiator. *Asian Journal of Mechatronics and Electrical Engineering*, 1(1), 25–34. <https://doi.org/10.55927/ajmee.v1i1.1310>
- Paramita, S., Permata S., M., Vaulina Y. D., E., Nasrokhah, N., & Iswanto, P. (2020). Pemilihan metode perhitungan kimia komputasi semi-empiris untuk pengembangan 1,3,4-thiadiazole. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 8(1), 51–56. <https://doi.org/10.30598/ijcr.2020.8-pon>
- Pranowo, H. D., & Hetadi, A. K. R. (2011). *Pengantar kimia komputasi*. Bandung: CV. Lubuk Agung.
- Prianto, B. (2007). Pemodelan kimia komputasi. *Berita Dirgantara*, 8(1), 6–9.
- Rahmawati, S., Radiman, C. L., Martoprawiro, M. A., Nuryanti, S., & Ma'ruf, A. (2019). Teori fungsional kerapatan struktur membran nata de coco tersulfonasi. *Chimica et Natura Acta*, 7(2), 87–90. <https://doi.org/10.24198/cna.v7.n2.23823>
- Saputra, A., Wijaya, K., Ahmad, M. N., & Tahir, I. (2013). Penggunaan metode semiempirik AM1 untuk pemilihan monomer fungsional efektif pada prasintesis polimer tercetak diazinon. *Jurnal Kimia Valensi*, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.15408/jkv.v3i1.323>
- Sarasam, A. R., Krishnaswamy, R. K., & Madihally, S. V. (2006). Blending chitosan with polycaprolactone: Effects on physicochemical and antibacterial properties. *Biomacromolecules*, 7(4), 1131–1138. <https://doi.org/10.1021/bm050935d>
- Vinsiah, R., & Fadhillah, F. (2018). Studi ikatan hidrogen sistem metanol-metanol dan etanol-etanol dengan metode molekular dinamik. *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 15(1), 14–22. <https://doi.org/10.31851/sainmatika.v15i1.1739>
- Yusuf, M. (2017). Studi mekanisme reaksi oligomerisasi gliserol menggunakan metode ab initio. *Jurnal Pendidikan Kimia*, 9(1), 236–243. <https://doi.org/10.24114/jpkim.v9i1.6185>
- Yusuf, M., Dari, N., Siregar, R., & Amne, D. P. F. (2022). The preparation and biodegradation of polyblend plastic film low-density polyethylene with PCL obtained using bis(dibenzoylmethane) zirconium(IV) catalyst. *Rasayan Journal of Chemistry*, 15(3), 1634–1641. <https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1536673>
- Yusuf, M., & Rahmah, M. (2023). Sifat mekanik dan morfologi poliblend polipropilena dengan poli(epsilon-kaprolakton) yang disintesis menggunakan katalis Zr beta-diketonate sebagai kandidat material untuk pembuatan benang jahitan operasi. *Jurnal Sains Dan Kesehatan*, 5(3), 388–393. <https://doi.org/10.25026/jsk.v5i3.1865>
- Yusuf, M., & Utama, E. (2023). A study of mechanical and thermal properties polymer blend from polystyrene with poly(epsilon-caprolactone) that obtained using bis(dibenzoylmethanato)zirconium(IV) chloride catalyst. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology*, 6(2), 119–124. <https://doi.org/10.24114/ijcst.v6i2.49366>