

SINTESIS POLIKARBONAT (PLASTIK HIJAU) DARIPADA CO₂ DAN SUMBER BAHAN DIPERBAHARUI

Muhammad Fauzan Bin Aminuddin, Siti Umairah Binti Norhisham, Azrul Zulhilmi Bin Ahamd Rosli &
Abbithra Devi A/P Shanmugam Pillai, Professor Madya ChM.Ts.Dr.Wan Nor Roslam Wan Isahak
*Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan
Malaysia, 43600 UKM Bangi,
Selangor DE, Malaysia*

**Pengarang koresponden; email: a173752@siswa.ukm.edu.my*

ABSTRAK - Karbon dioksida (CO₂) dianggap sebagai salah satu pencemar alam sekitar utama yang menyebabkan kesan rumah hijau. Dari sudut ekonomi dan ekologi, penggunaan CO₂ adalah sangat wajar dan bukannya membuangnya. Salah satu pendekatan penggunaan kos efektif ialah menggunakan CO₂ untuk menghasilkan satu siri polimer dengan sifat terbiodegradasi. Jadi, matlamat utama dalam kajian ini adalah untuk mensintesis polikarbonat daripada karbon dioksida sebagai sumber bahan diperbaharui dan mesra alam sekitar. Terdapat pelbagai fungsi polikarbonat dalam industri, contohnya industri plastik, automotif, pembungkusan dan sebagainya. Secara umum diketahui bahawa sintesis karbonat akan menggunakan agen dehidrasi seperti fosgen tetapi kaedah ini akan menyebabkan pencemaran alam sekitar kerana agen yang digunakan adalah toksik. Oleh itu, kaedah yang baru diperkenalkan dengan menggunakan kumpulan berfungsi diol, karbon dioksida, CO₂, dan mangkin serium (ii) oksida, CeO₂, siklopentil metil eter dan gel silika. Kaedah ini dikatakan lebih hijau kerana tidak menggunakan bahan toksik sebagai substrat dan mengurangkan kandungan CO₂ di atmosfera lalu mengurangkan kesan rumah hijau. Ujikaji akan dijalankan di bawah keadaan optimum iaitu akan menggunakan 0.34g CeO₂, CO₂ dialirkan selama 1 minit, 160 °C dan di dalam reaktor autoklaf. Proses ini akan dijalankan selama 6 jam bagi mendapatkan kadar penukaran yang tinggi. Kaedah ini menggunakan silika gel untuk menyerap air yang terhasil semasa tindak balas berlaku kerana kaedah ini dapat menganjakkan keseimbangan kepada bahagian produk untuk menghasilkan penukaran yang lebih tinggi. Antara faktor yang boleh mempengaruhi kadar penukaran dalam kaedah ini adalah penggunaan jenis reaktor, jumlah penggunaan mangkin, tekanan, suhu kadar tindak balas dan kadar alir karbon dioksida, CO₂.

Kata kunci: Karbon dioksida; Polikarbonat; Mangkin CeO₂,

1. PENDAHULUAN

Pengurangan gas karbon dioksida di atmosfera merupakan matlamat utama bagi manusia untuk mencapai masyarakat yang mampan kerana pemanasan global dan masalah berkaitan seperti cuaca yang tidak normal, kenaikan paras laut dan perubahan sistem ekologi akan menjejaskan kehidupan manusia. CO₂ merupakan sumber yang boleh diperbaharui, banyak, murah, tidak mudah terbakar dan tidak toksik (Gu et al., 2019). Transformasi CO₂ secara langsung kepada bahan kimia yang berharga adalah salah satu topik paling hangat dari sudut pandang kimia. Transformasi boleh dikategorikan terutamanya

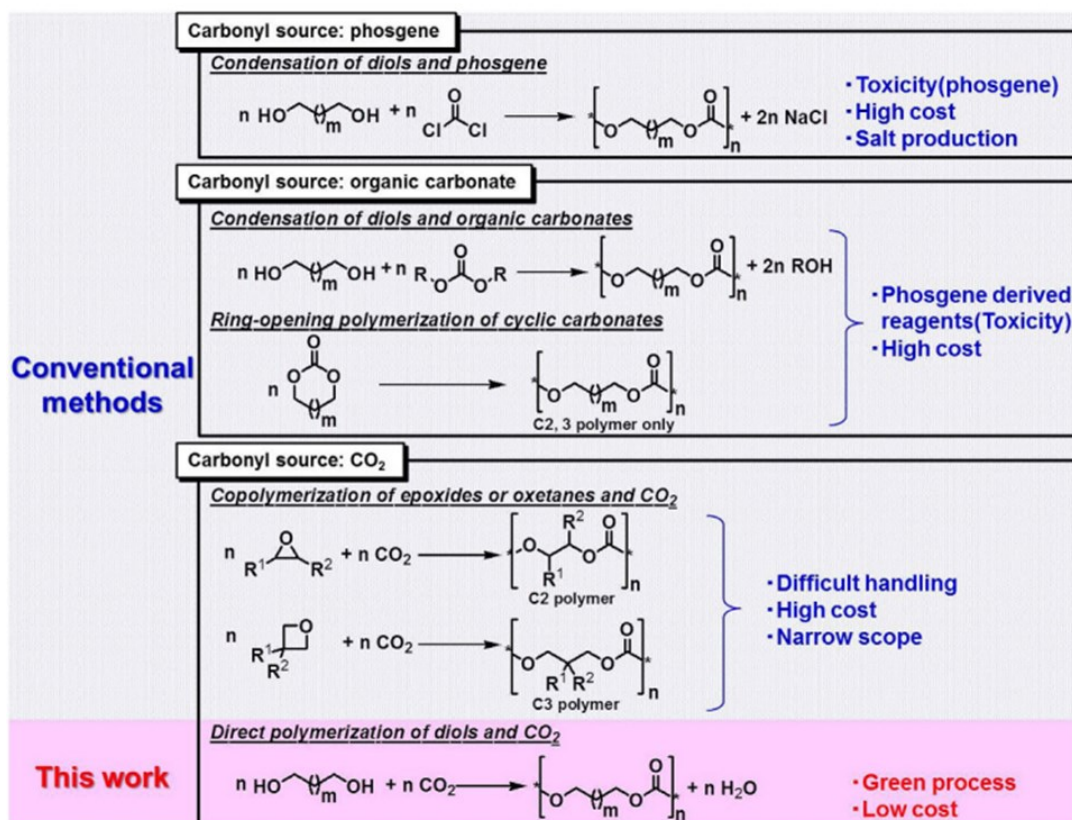
kepada dua kaedah, transformasi reduktif dan transformasi bukan reduktif (Tamura et al., 2016). Transformasi bukan reduktif terdiri daripada tindak balas dengan sebatian yang mempunyai kumpulan berfungsi polar seperti alkohol dan amina untuk menghasilkan pelbagai bahan kimia penting seperti urea, karbamat, karbonat dan polikarbonat, dan ia bagus kerana input memerlukan tenaga yang lebih rendah berbanding dengan transformasi reduktif (Tamura et al., 2016).

Plastik telah merevolusikan sektor perindustrian dengan membenarkan penggantian blok bangunan semula jadi, seperti logam, kayu dan batu, dengan bahan sintetik yang lebih murah dan tahan lama (Huang et al., 2020). Pada masa ini, kebanyakan plastik dihasilkan daripada sumber petroleum, dan penyalahgunaan bahan api fosil tersebut mempercepatkan pelepasan karbon dioksida, membawa kepada persekitaran global yang lebih panas dan tidak stabil (Huang et al., 2020). Oleh itu, terdapat inisiatif yang besar untuk mempelbagaikan industri plastik dengan menghasilkan bahan dengan impak kepada alam sekitar yang lebih rendah. Pada masa ini, poliester seperti poli(asid laktik) (PLA) atau polibutilena suksinat (PBS) menyumbang sebahagian besar kapasiti pengeluaran global plastik terbiodegradasi (Huang et al., 2020). Walau bagaimanapun, polikarbonat boleh dihasilkan dan telah terkenal dengan kebolehan biodegradasi boleh menjadi plastik yang lestari dan semakin berguna.

Penghasilan polikarbonat daripada karbon dioksida yang dianggap sebagai bahan boleh diperbaharui adalah menarik kerana kosnya yang rendah, tidak toksik dan ketersediaan dalam alam semula jadi dan proses perindustrian. (Bian et al., 2016). Penghasilan polikarbonat dapat membantu dalam menghasilkan plastik yang mudah terbiodegradasi. Polikarbonat mewakili kelas polimer yang berpotensi terbiodegradasi dan biokompatibel (Bian et al., 2016) telah digunakan secara meluas dalam bidang pemangkin dan kimia biologi kerana sifat asid-bes dan redoksnya dalam sintesis organik fasa cecair pada suhu rendah ($\leq 473\text{K}$) (Wang, Y. et al., 2013).

Polikarbonat telah dihasilkan secara industri dengan menggunakan fosgen sebagai sumber karbonil, walau bagaimanapun, fosgen adalah sangat toksik, dan proses itu menghasilkan kuantiti garam yang banyak melalui peneutralan. Untuk mengatasi kelemahan ini, proses menggunakan karbonat organik sebagai sumber karbonil telah dibangunkan seperti pemeluwapan diol dan karbonat organik dan pempolimeran pembukaan cincin karbonat kitaran seperti Rajah 1 (Venkataraman, S. et al., 2015). Walau bagaimanapun, proses ini mempunyai masalah yang sama dengan proses fosgen kerana substrat karbonat organik dalam proses ini biasanya disintesis oleh tindak balas fosgen dengan alkohol atau epoksida yang sepadan, dan proses sintesis alternatif alam sekitar-jinak karbonat organik belum ditubuhkan. Bagi proses menggunakan CO₂ sebagai sumber karbonil, kopolimerisasi eter kitaran dan CO₂ telah diasas secara intensif seperti Rajah 1 (Abts et al., 2014). Epoksida dan oxetane telah digunakan sebagai bahan permulaan, namun kopolimerisasi CO₂ dan eter kitaran dengan gelang lima anggota atau lebih besar tidak dilaporkan sama sekali kerana eter kitaran tersebut sukar disediakan kerana

kestabilan yang rendah (Tamura et al., 2016). Sebaliknya, pempolimeran langsung diol dan CO₂ melalui pemeluwapan dehidrasi akan membolehkan sintesis polikarbonat yang mengandungi rantai alkil yang lebih panjang (Rajah 1). Walau bagaimanapun, pemeluwapan dehidrasi diol dan CO₂ sangat terhad oleh keseimbangan tindak balas.



Rajah 1 Kaedah sintesis polikarbonat

Sumber: Tamura et al. 2016

Namun, berdasarkan ujikaji yang dijalankan gabungan CeO₂, siklopentil metil eter, silika gel adalah sistem pemangkin yang digunakan dalam pempolimeran langsung CO₂ dan diol. Ini berdasarkan penghasilan keterpilihan sintesis yang diperolehi. Dalam sistem mangkin CeO₂, siklopentil metil eter dan silika gel, air yang dihasilkan telah diserap oleh sistem bermangkin silika gel dan mengalihkan keseimbangan tindak balas ke bahagian hasil. Di samping itu, penambahan silika gel kepada CeO₂ boleh menyumbang kepada peningkatan kadar pembentukan karbonat. Hal menunjukkan bahawa silika gel berfungsi sebagai komangkin untuk tindak balas pembentukan polikarbonat.



Rajah 2 Sintesis langsung karbonat organik daripada CO₂ dan diol menggunakan autoklaf

Sumber: Gu et al., 2021

Tindak balas bermula dengan (i) penjerapan diol pada permukaan CeO₂ untuk membentuk adspesies alkoksida (Tamura et al., 2016). Seterusnya (ii) penyisipan CO₂ pada beberapa adspesies alkoksida, memberikan beberapa adspesies karbonat (Tamura et al., 2016). Berikutnya (iii) serangan nukleofilik anion oksigen dalam adspesies alkoksida kepada adspesies karbonat untuk mendapatkan karbonat yang sepadan daripada 1,3-propanediol dan H₂O. (iv) Penyerapan H₂O terhasil melalui silika gel (Tamura et al., 2016). (v) Akhir sekali, tindak balas lanjut karbonat terhasil dengan CO₂ 1,3-propanediol atau cooligomer terhasil, memberikan polytetramethylenecarbonate (Tamura et al., 2016). Di antara langkah tindak balas ini, langkah (iv) adalah sangat penting dalam sintesis polikarbonat, yang secara drastik akan mengalihkan tindak balas ke bahagian produk dengan penyingkiran H₂O daripada media tindak balas.

1.1 Pernyataan Masalah

Pada masa kini, plastik telah merevolusikan sektor perindustrian dengan menggantikan bahan-bahan konvensional seperti kertas, logam, kayu, kaca dan batu dengan bahan yang lebih murah, lebih tahan lama serta bahan sintetik yang boleh disesuaikan (Andrady, A.L. 2009). Walaupun pembangunan berterusan industri plastik telah merevolusikan banyak sektor termasuk automotif, penjagaan kesihatan, elektronik dan pembungkusan, tekanan alam sekitar untuk menghasilkan dan melupuskan bahan-bahan tersebut amat ketara (Gibb, B.C. 2019). Pada abad ini, majoriti plastik dihasilkan daripada sumber petroleum, dan penyalahgunaan bahan api fosil tersebut menyumbang kepada pelepasan karbon dioksida (CO₂) yang telah membawa kepada persekitaran global yang panas, dan tidak stabil. Suhu permukaan global meningkat disebabkan peningkatan penghasilan gas rumah hijau. Gas rumah hijau dibebaskan melalui pembuangan sisa plastik tak terkawal. Pembebasan karbon global direkodkan sebanyak 15 bilion tan pada tahun 1970 dan meningkat kepada 37.1 bilion tan pada tahun 2018 (Global

Carbon Project, 2018). Mengikut Bank Dunia, pada 2016, 242 juta tan sampah plastik dihasilkan secara global, iaitu 12 peratus daripada semua sisa pepejal perbandaran. Sisa ini berasal daripada tiga wilayah iaitu 57 juta tan dari Asia Timur dan Asia Pasifik, 45 juta tan dari Eropah dan Asia Tengah, manakala 35 juta tan lagi dari Amerika Utara (Samsul Arrieya Ariffin, 2020). Oleh itu, pembangunan proses yang berkesan untuk pembuatan polimer daripada sumber yang boleh diperbaharui telah menarik perhatian yang ketara. Satu contoh yang menonjol ialah penghasilan polikarbonat (plastik hijau) daripada karbon dioksida (CO_2), yang dianggap sumber karbon boleh diperbaharui yang menarik kerana kosnya yang rendah, tidak toksik, dan ketersediaan dalam alam semula jadi (Aresta, M. 2010). Polikarbonat adalah bahan kimia yang berguna dengan permintaan yang tinggi (4.3 juta tan pada 2015, dan dijangka mencapai 7.7 juta tan menjelang 2024) sebagai plastik kejuruteraan. Polikarbonat telah dihasilkan dalam industri dengan menggunakan fosgen sebagai sumber karbonil. Walau bagaimanapun, fosgen adalah sangat toksik, dan proses itu menimbulkan sejumlah besar garam dengan peneutralan. Untuk mengatasi kelemahan ini, proses yang menggunakan karbonat organik sebagai sumber karbonil telah dibangunkan iaitu pemeluwapan diol dan karbonat organik (Park, J.H. et.al 2013). Dengan ini, kita akan mensintesis polikarbonat diol (plastik hijau) daripada karbon dioksida dan sumber bahan diperbaharui.

1.2 Objektif Penyelidikan

1. Untuk mensintesis karbonat daripada karbon dioksida sebagai sumber bahan mesra alam sekitar.
2. Untuk mengkaji parameter kesan tekanan dan mangkin dalam proses penghasilan polikarbonat selepas tindak balas karbon dioksida dengan diol.

2. KANDUNGAN UTAMA

Bahagian metodologi mengandungi maklumat tentang penyediaan alat radas dan bahan, dan juga kaedah uji kaji secara terperinci.

2.1 Kaedah Penghasilan Polikarbonat Diol Daripada Karbon Dioksida



2.2 Alat Radas Dan Bahan

2.2.1 Bahan

1. 0.34g serium (ii) oksida, CeO_2 (2 mmol)
2. 1.522g 1,3-propanadiol (20 mmol)
3. 20g pelarut siklopentil metil eter (200 mmol)
4. 1g agen pengering gel silika

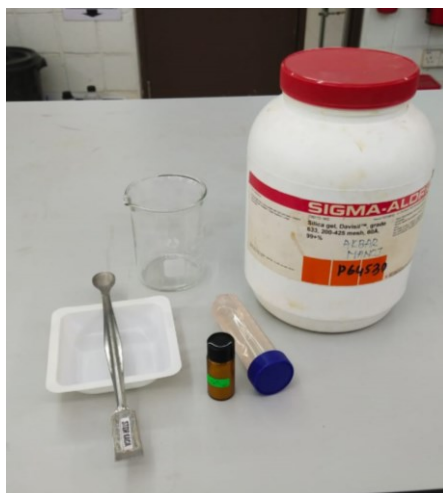
2.2.2 Alat Radas

1. Reaktor Autoklaf
2. Pengempar 4000 rpm
3. Penitis plastik
4. 2 bikar isipadu 50mL
5. 2 cawan penimbang

6. 6 bekas simpanan produk akhir
7. 2 spatula
8. Bar magnet
9. Pengacau magnet
10. Pengukur berat elektronik

2.3 Penyediaan Alat Radas Dan Bahan Kimia

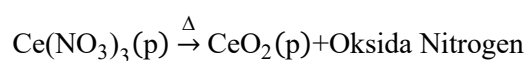
Bahan kimia yang digunakan dalam ujikaji ini ialah mangkin serium (ii) oksida (CeO_2), sebatian organik 1,3-propanadiol, pelarut siklopentil metil eter, agen pengering gel silika dan gas karbon dioksida serta semua alat radas akan disediakan di makmal teknologi zarah Universiti Kebangsaan Malaysia.



Rajah 2.1 Bahan-bahan kimia

2.4 Penyediaan Serium (ii) oksida

Serium (ii) oksida disediakan melalui penguraian termal serium (III) nitrat pada suhu 400 °C selama 6 jam di dalam relau. Persamaan kimia yang berlaku di dalam relau adalah seperti berikut (Strydom & Vuuren 1987).



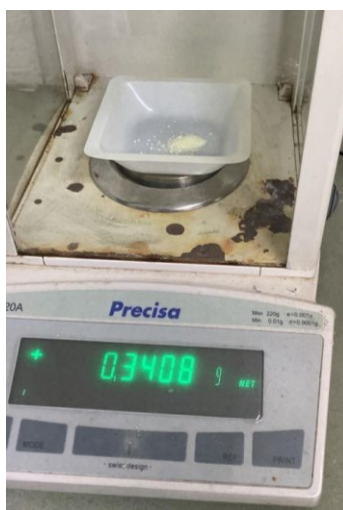
Berikut ialah gambar rajah serium (ii) oksida terhasil selepas penguraian termal selama 6 jam



Rajah 2.2 Serum (ii) oksida

2.5 Pengukuran Dan Pencampuran Bahan Kimia

0.34g mangkin serum (ii) oksida (CeO_2), 1.522g sebatian organik 1,3-propanadiol, 20g pelarut siklopentil metil eter dan 1g agen pengering gel silika akan diukur menggunakan pengukur berat elektronik. Kesemua bahan kimia akan dicampurkan di dalam bikar isipadu 50mL selepas pengukuran berat dilakukan. Campuran sebatian kimia ini akan dikacau dengan baik menggunakan bar magnet dan pengacau magnet pada 700 rpm selama 10 minit. Prosedur yang sama dijalankan mencampurkan semua bahan kimia tersebut tanpa mangkin sebagai ujikaji kawalan.



Rajah 2.3 Pengukuran bahan kimia



Rajah 2.4 Pengacauan campuran bahan kimia

2.6 Tindak Balas Kimia Antara Campuran Sebatian Kimia Dan Karbon Dioksida Dalam Reaktor Autoklaf

Campuran sebatian bahan kimia ini akan dimasukkan di dalam reaktor autoklaf. Seterusnya, campuran udara di dalam reaktor akan disingkirkan menggunakan gas karbon dioksida pada suhu bilik, 30°C selama 1 minit. Selepas itu, pengaliran karbon dioksida dalam reaktor autoklaf pada tekanan berbeza iaitu 10 bar, 22 bar dan 35 bar. Reaktor Autoklaf akan dipanaskan selama 40 minit daripada suhu bilik 30°C (303 K) sehingga mencapai suhu 160°C (433 K). Masa tindak balas yang diambil ialah selama 6 jam pada suhu 160°C (433 K) dan ujikaji kawalan juga diulang menggunakan prosedur yang sama.



Rajah 2.5 Reaktor autoklaf



Rajah 2.6 Suhu reaktor autoklaf

2.7 Pengemparan Produk Campuran Tindak Balas Kimia

Pengemparan ialah proses menggunakan daya emparan yang lebih tinggi berbanding daya graviti untuk memisahkan ampaijan seperti pepejal dan cecair pada campuran bahan kimia (Upadhyay et al. 2019). Pengemparan produk terhasil pada mesin pengempar pada kelajuan 4000 rpm selama 15 minit. Akhir sekali, hasil emparan sebatian itu akan diambil bagi analisis yang lebih lanjut (Gu Yu et al. 2021).



Rajah 2.7 Proses pengemparan

Bagi pengiraan peratusan penukaran, bagi polikarbonat diol, persamaan berikut akan digunakan (Masazumi et al. 2016).

$$\text{Penukaran(\%)} = 100 \times \frac{1 - \text{Jumlah diol terhasil selepas tindak balas}}{\text{Jumlah diol sebelum tindak balas}}$$

2.8 Analisis Campuran Tindak Balas Menggunakan FTIR

Fourier-transform infrared spectroscopy atau FTIR ialah satu kaedah bagi memperolehi spektrum infrared bagi penyerapan atau pancaran dalam semua keadaan jirim sama ada pepejal, cecair dan gas (Song 2017). Melalui kaedah ini, data kelompok berfungsi seperti eter, diol dan hidroksil dapat diketahui dengan lebih jelas. FTIR mampu untuk mengumpul data yang mempunyai jarak gelombang antara 5000

cm^{-1} dan 400 cm^{-1} bagi panjang gelombang di pertengahan gelombang Inframerah dan $10,000 \text{ cm}^{-1}$ sehingga 4000 cm^{-1} bagi panjang gelombang yang berdekatan dengan gelombang Inframerah (Song 2017).

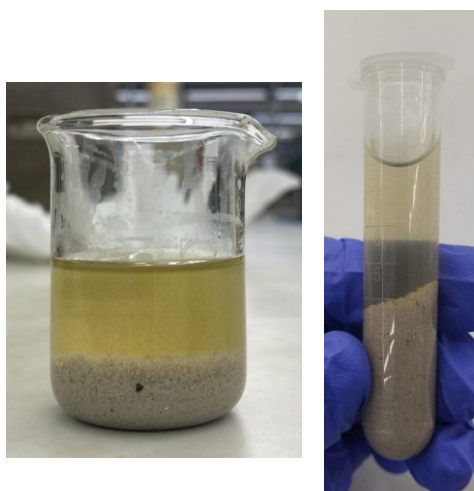
Ujikaji ini akan menggunakan panjang gelombang antara 4000 cm^{-1} dan 500 cm^{-1} bagi sampel cecair dan pepejal daripada produk kimia terhasil serta bahan kimia sebatian organik 1,3-propanadiol untuk menganalisis kehadiran polimer polikarbonat diol.

3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Hasil produk dan 1,3-propanadiol yang didapati akan dianalisis menggunakan Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) untuk memastikan terdapatnya pembentukan karbonat. 1,3-propanadiol akan dibandingkan dengan hasil produk untuk memastikan terjadinya tindak balas ketika ujikaji dijalankan.

3.1 Pemerhatian Produk

Rajah 3.1 dan 3.2 merupakan bentuk hasil produk setelah ujikaji dijalankan berdasarkan keadaan tertentu.



Rajah 3.1 Tekanan 35 bar dengan mangkin

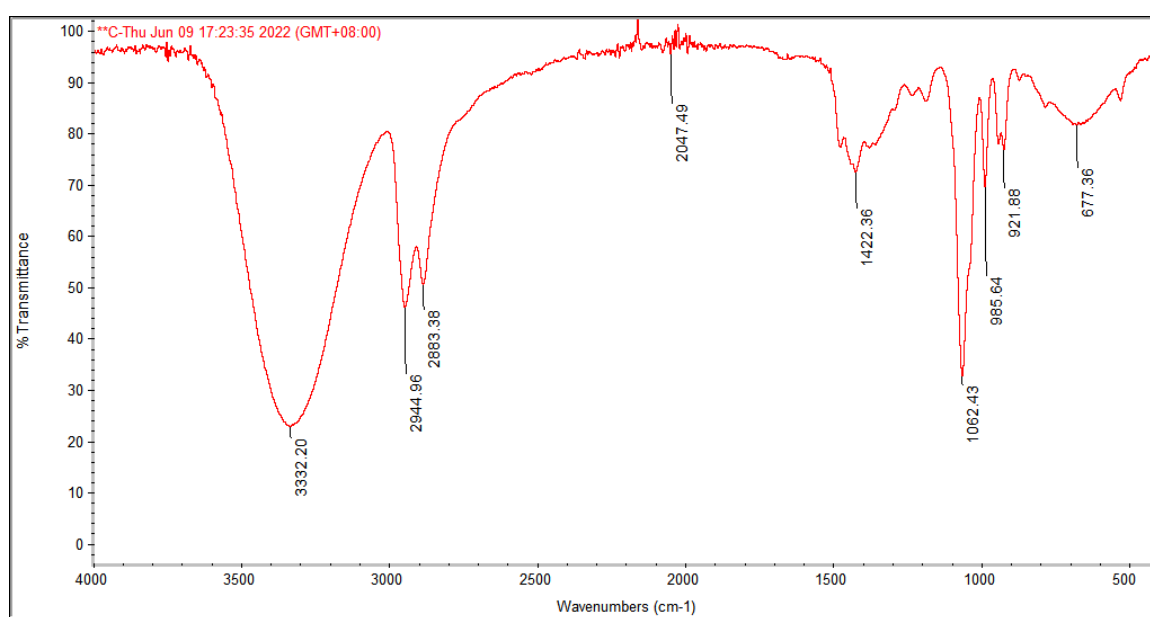


Rajah 3.2 Tekanan 35 bar dengan tanpa mangkin

Berdasarkan rajah tersebut didapati bagi kedua-dua keadaan iaitu menggunakan mangkin dan tidak menggunakan mangkin berada dalam bentuk pepejal dan cecair. Oleh itu, cecair tersebut akan dianalisis menggunakan FTIR.

3.2 Analisis Data

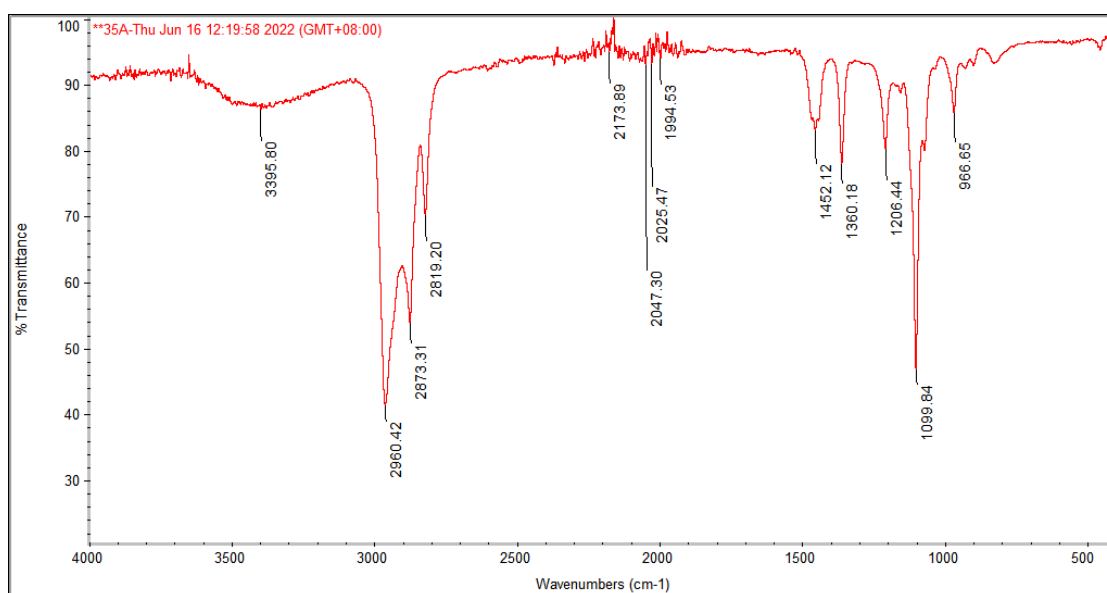
Bagi analisis bahan tindak balas, 1,3 propanadiol telah dianalisis menggunakan FTIR sebagai rujukan kepada nilai tulis bagi jumlah 1,3 propanadiol sebelum tindak balas. Berdasarkan graf kehantaran inframerah melawan nombor gelombang (Rajah 3.3), pada nombor gelombang 1422.36 cm^{-1} dan julat nombor gelombang yang diterima ialah antara 1420 sehingga 1440 cm^{-1} (NIST n.d.). Puncak menunjukkan sifat puncak yang tajam bermaksud 1,3 propanadiol menghasilkan keamatan penyerapan pada spektrum inframerah tertinggi (Manviri, Keshu dan Uma, 2022).



Rajah 3.3 1,3-propanadiol

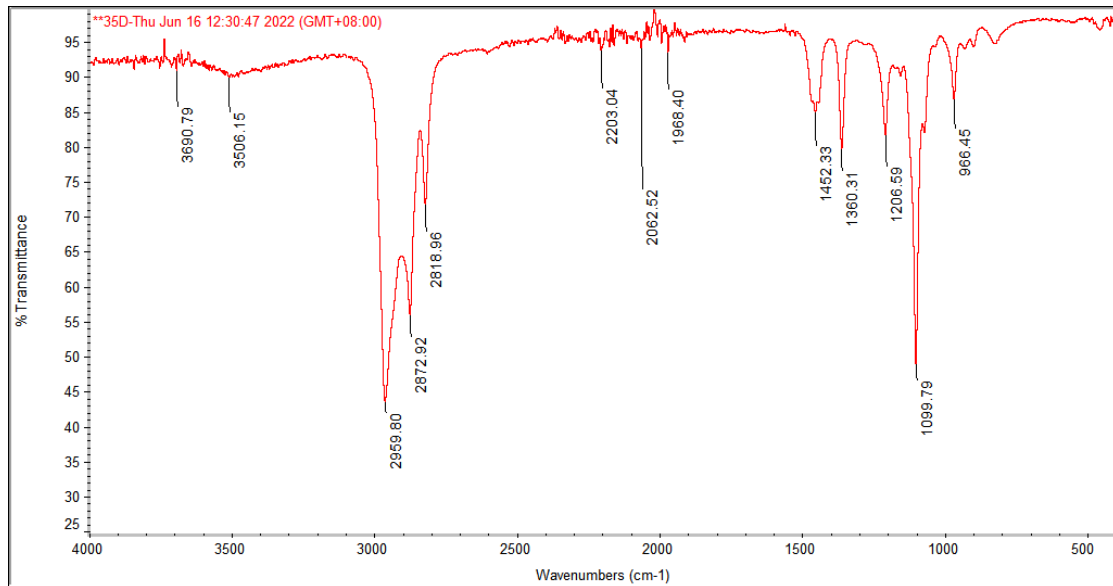
3.3 Analisis FTIR bagi Tekanan 35 Bar dengan Mangkin dan Tanpa Mangkin

Berdasarkan hasil analisis FTIR bagi semua sampel produk dalam bentuk cecair dan pepejal. Puncak terhasil menunjukkan karbonat organik ialah pada julat nombor gelombang 1200-1250 cm^{-1} menunjukkan regang O-C-O, nombor gelombang 1000-1060 cm^{-1} bagi regang O-C-C dan regang C=O dapat dilihat pada nombor gelombang 1760-1790 cm^{-1} bagi campuran karbonat (Brian 2018). Bagi regang C=O tidak dapat dilihat dengan jelas kerana mempunyai nilai penghasilan yang rendah. Namun terdapat nombor regang O=C=O pada julat 2000-2400 cm^{-1} menunjukkan bahawa potensi regang C=O itu wujud (Anon. n.d.). Pada regang 3200-3500 merujuk kepada kumpulan hidroksil yang menunjukkan nilai kehantaran yang tinggi. Puncak baru nombor gelombang 1452.12 cm^{-1} merujuk kepada nombor gelombang bahan tindak balas, 1,3 propanadiol selepas proses tindak balas kerana menunjukkan sifat puncak yang sama untuk 1,3 propanadiol sebelum tindak balas. Perbezaan puncak ini dan puncak sebelum tindak balas dapat memberikan nilai penukaran 1,3 propanadiol.



Rajah 3.4 Produk cecair pada 35 bar dengan mangkin

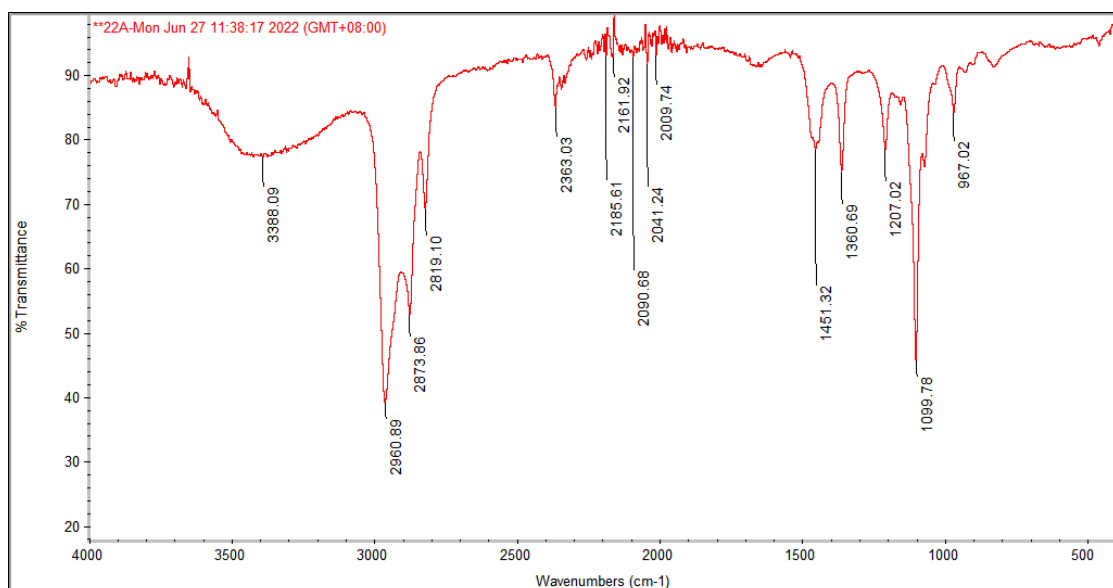
Ujikaji tindak balas antara 1,3 propanadiol dan gas karbon dioksida tanpa mangkin pada 35 bar digunakan sebagai ujikaji kawalan. Setiap ujikaji tindak balas dengan tekanan berbeza iaitu 10 bar, 22 bar dan 35 bar akan dibandingkan dengan ujikaji tanpa mangkin bagi membandingkan nilai penukaran 1,3 propanadiol selepas tindak balas berlaku. Rajah 3.5 menunjukkan analisis FTIR bagi produk cecair tanpa mangkin.



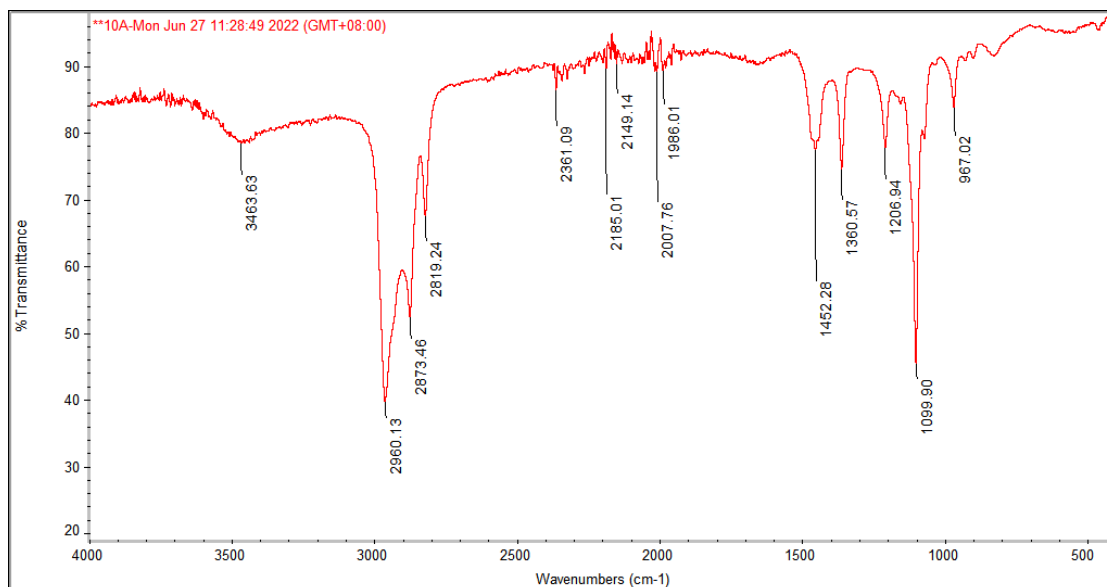
Rajah 3.5 Produk cecair pada 35 bar tanpa mangkin

3.4 Analisis FTIR bagi Tekanan 22 Bar dan 10 Bar dengan Mangkin

Produk cecair pada tekanan 22 bar dan 10 bar dengan mangkin menunjukkan pengurangan nilai kehantaran inframerah pada puncak 1,3 propanadiol berbanding pada produk cecair dengan mangkin pada 35 bar. Ini menunjukkan bahawa kadar tindak balas antara 1,3 propanadiol dan gas karbon dioksida adalah berkadar terus dengan nilai tekanan gas karbon dioksida. Parameter lain seperti suhu, 160°C (433 K) dan masa tindak balas yang diambil, 6 jam telah dimalarkan.



Rajah 3.6 Produk cecair pada 22 bar dengan mangkin



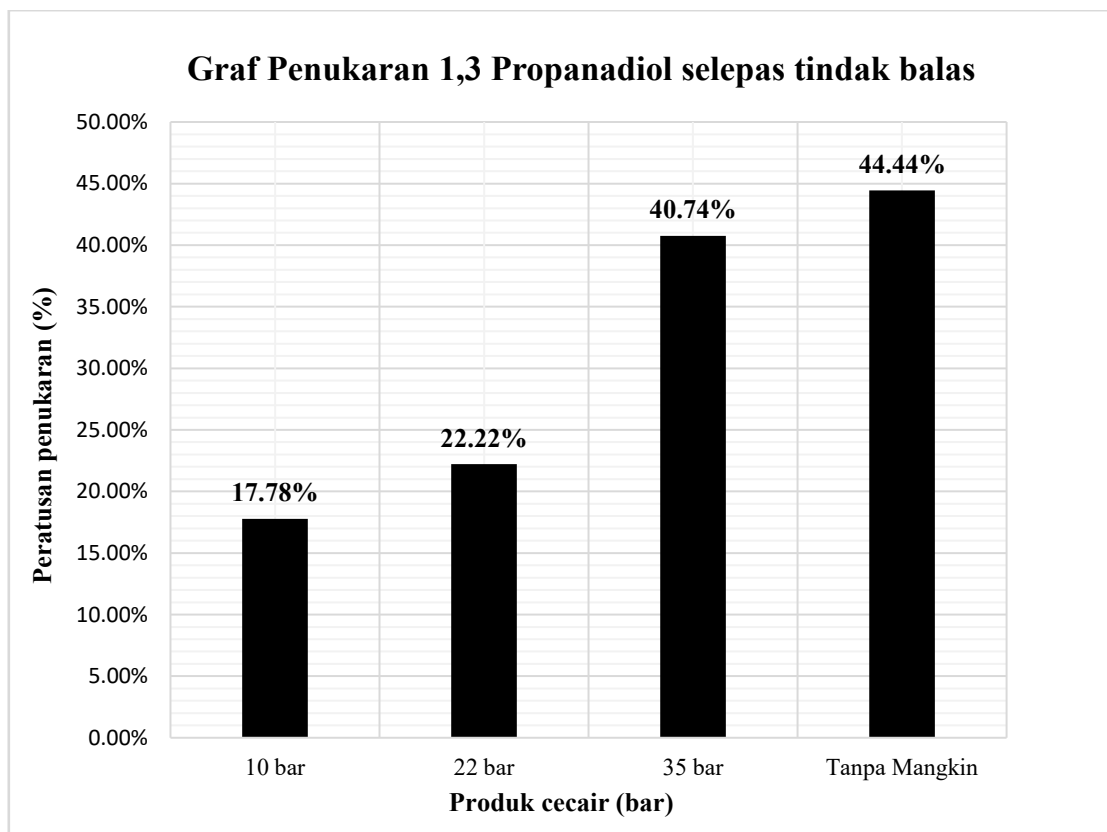
Rajah 3.7 Produk cecair pada 10 bar dengan mangkin

3.5 Jumlah Penukaran

Pengiraan jumlah penukaran bagi bahan tindak balas 1,3 propanadiol sebelum dan selepas tindak balas ditunjukkan pada jadual serta graf penukaran 1,3 propanadiol.

Jadual 3.1 Tekanan gas karbon dioksida dan penukara 1,3 propanadiol

Tekanan Gas Karbon Dioksida (bar)	Penukaran 1,3 Propanadiol (%)
Tanpa mangkin	44.44
35	40.74
22	22.22
10	17.78



Rajah 3.8

Graf penukaran 1,3 Propanadiol selepas tindak balas

3.6 Perbincangan

Tindak balas antara 1,3 propanadiol dan gas karbon dioksida dengan mangkin pada tekanan tinggi menghasilkan nilai penukaran yang lebih tinggi berbanding pada tekanan rendah. Oleh itu, penggunaan tekanan tinggi semasa tindak balas antara diol dan CO₂ telah dilaporkan penting untuk memberi kesan tindak balas spontan dalam penghasilan polikarbonat (Gu et al. 2021). Nilai berat molekul juga didapati berkurang apabila nilai tekanan digunakan semasa tindak balas kimia dikurangkan (Tamura et al. 2016).

Peratusan penukaran bagi 1,3 propanadiol tanpa mangkin lebih tinggi berbanding dengan tindak balas bersama mangkin ini menunjukkan mangkin yang digunakan adalah tidak serasi dengan substratnya. Menurut teori mangga dan kunci, mangkin adalah bersifat sangat spesifik dan bentuk bahan tindak balas haruslah serasi dengan mangkin supaya tindak balas kimia boleh berlaku (Shuler & Kargi, 2002). Antara mangkin lain yang boleh digunakan bagi menggantikan CeO₂ ialah logam oksida seperti ZnO dan La₂O₃ yang menunjukkan potensi menghasilkan polikarbonat (Tamura et al. 2016).

Penggunaan 2-sianopiridina sebagai agen pengontangan yang berupaya untuk membuang komposisi air semasa hidrasi 2-sianopiridina kepada 2-pikolinamida yang mengubah keseimbangan tindak balas kepada bahagian produk (Gu et al. 2019). Selain itu, kehadiran 2-sianopiridina juga sebagai agen penggalak mampu untuk meningkatkan kadar pembentukan karbonat sebanyak 32 kali ganda kerana ia bertindak sebagai penolong mangkin (Gu et al. 2019). Walaupun 2-sianopiridina mempunyai banyak manfaat bagi tindak balas kimia ini, namun ia juga bersifat neurotoksin yang mampu mengganggu sistem saraf organisma hidup seperti manusia dan haiwan (NCBI 2022).

Semasa ujikaji ini dijalankan, agen pengontangan yang digunakan ialah gel silika sebagai ganti kepada 2-sianopiridina kerana gel silika mampu untuk memisahkan gas dan cecair (Ratel, Kuznik dan Johannes 2022). Dalam ujikaji ini, silika gel akan bertindak untuk menjerap wap air di dalam reaktor autoklaf. Selain itu penggunaan pelarut siklopentil metil eter yang bersifat mesra alam, tidak bertoksik serta mempunyai kestabilan dalam keadaan berasid kuat atau basic (Gonzalo, Alcantara dan de Maria 2019). Maka penggunaan pelarut ini mampu mengurangkan pencemaran dalam sisa bahan kimia.

Berdasarkan Gu et al. 2021 jumlah hasil yang rendah adalah disebabkan oleh penggunaan 3 karbon (C3) α,ω -diols iaitu 1,3 propanadiol di dalam ujikaji ini. Penggunaan jumlah karbon yang lebih banyak sebagai bahan tindak balas iaitu julat karbon antara C4 sehingga C10 α,ω -diols berpotensi Amenghasilkan jumlah hasil yang lebih banyak. Peningkatan penukaran juga boleh ditingkatkan dengan menggunakan bahan kimia penggalak sama ada 2-sianopiridina atau alternatifnya 2-furonitril dimana bahan ini juga bertindak sebagai agen pengeringan yang mampu meningkatkan berat purata molekul polikarbonat yang akan terhasil (Gu et al. 2021).

3.7 Ralat

Ralat merupakan salah satu punca ujikaji yang dijalankan tidak menjadi atau tidak tepat. Antara ralat yang berlaku dalam ujikaji ini adalah ralat sistem dimana alat pengukur tolok tekanan tidak disediakan pada reaktor autoklaf. Oleh itu, bacaan tekanan di dalam reaktor tidak dapat ditentukan dengan tepat. Antara cara yang digunakan untuk menangani masalah ini adalah semua tekanan gas karbon dioksida akan dialirkan dalam jangka masa yang sama iaitu 1 min.

Seterusnya, kesusutan berat yang berlaku ketika pemindahan produk daripada reaktor ke dalam bikar. Berat yang didapati adalah tidak sama seperti yang dihasilkan di dalam reaktor. Jadi jumlah hasil yang didapati akan berbeza. Ujikaji lanjutan harus dilakukan bagi mendapatkan data yang lebih tepat iaitu dengan melakukan pengulangan sekurang-kurangnya 3 kali untuk mendapatkan purata data. Nilai hasil bagi polikarbonat terhasil juga tidak dapat ditentukan apabila ketiadaan produk polikarbonat asli untuk membuat perbandingan antara produk terhasil dengan produk komersial.

4. KESIMPULAN

Kesimpulannya, polikarbonat daripada karbon dioksida berjaya dihasilkan dimana dapat dilihat pembentukan puncak baru berdasarkan analisis FTIR pada gelombang 1452.12 cm^{-1} . Kesan mangkin ke atas penghasilan polikarbonat juga dapat dilihat daripada jumlah penukaran 1,3 propanadiol kepada produk akhir berdasarkan analisis FTIR. Kehadiran mangkin dan tidak bermangkin di dalam ujikaji telah dikira iaitu pada tekanan 35 bar dengan mangkin didapati hasil penukarannya ialah 40.74 % manakala tanpa mangkin ialah 44.44 %. Selain itu, hasil penukaran pada tekanan 22 bar dan 10 bar ialah 22.22 % dan 17.78 %. Keputusan yang tidak memuaskan terjadi kerana kehadiran ralat seperti penggunaan

mungkin yang salah dan juga ralat sistematik terjadi di dalam ujikaji yang dijalankan seperti tiada alat pengukur tolok tekanan pada reaktor autoklaf. Ujikaji lanjutan harus dijalankan bagi mendapatkan data yang lebih tepat. Oleh itu, semua objektif ujikaji ini berjaya dicapai.

PENGHARGAAN

Setinggi-tinggi ucapan terima kasih dan sejuta penghargaan diberikan kepada Dr.Wan Nor Roslam Wan Isahak selaku penyelia makmal bersepadu yang telah memberi dorongan dan membimbing kami sepanjang menyiapkan tugas ini. Kami sangat menghargai sikap kerjasama setiap orang dalam kumpulan ini. Kami berterima kasih di atas maklumat, cadangan, dan dorongan yang dikongsi antara kami. Kami juga menghargai masa dan tenaga ahli kumpulan yang telah disumbangkan sepanjang menyiapkan tugas ini. Selain itu, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada rakan sekelas untuk maklumat mengenai projek ini, kerana ia membolehkan kami menyelesaikan projek kami dengan jayanya. Tambahan pula, kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada staff makmal, Encik Azreen dan Puan Ninie yang membantu kita untuk meminjam alat dan bahan yang diperlukan dalam uji kaji kita. Akhir kata, kami sekali lagi ingin mengucapkan terima kasih kepada semua orang yang telah terlibat secara langsung dan tidak langsung sepanjang projek ini dijalankan.

RUJUKAN

- Andrady, A. L., & Neal, M. A. 2009. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526):1977–1984.
- Anon. n.d. IR Spectrum Table by Frequency Range. *IR Spectrum Table & Chart*. <https://www.sigmaaldrich.com/MY/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table>.
- Abts, G., Eckel, T., & Wehrmann, R. (2014). Polycarbonates. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 1–18). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a21_207.pub2
- Bian, S., Pagan, C., Andrianovaartemyeva, A. A., & Du, G. (2016). Synthesis of Polycarbonates and Poly (ether carbonate)s Directly from Carbon Dioxide and Diols Promoted by a Cs₂CO₃/CH₂Cl₂ System. *ACS Omega*, 1(5), 1049–1057.
- Brian C.S., 2018. The Infrared Spectra of Organic Carbonates. The C=O Bond, Part VII: Aromatic Esters, Organic Carbonates, and More of the Rule of Three. <https://www.spectroscopyonline.com/view/co-bond-part-vii-aromatic-esters-organic-carbonates-and-more-rule-three>.
- Erno, P., Philippe, B., & Martin, B., (2008). Tables of Spectral. (Eds. 4). *DataStructure Determination of Organic Compounds*. Zurich & Minneapolis: Springer.
- Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4): 2141–2194. Retrieved from, <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018> [10 APRIL 2022]

- Gonzalo, G.D., Alcantara, A.R., & Maria, P. D. D. 2019. Motivation for eco-friendly solvents and for CPME Cyclopentyl-methyl ether (CPME): *Versatile eco-friendly solvent for applications in Biotechnology and Biorefineries*. DOI: 10.1002/cssc.201900079.
- Gu, Y., Matsuda, K., Nakayama, A., Tamura, M., Nakagawa, Y., & Tomishige, K. (2019). Direct Synthesis of Alternating Polycarbonates from CO₂ and Diols by Using a Catalyst System of CeO₂ and 2-Furonitrile. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(6), 6304–6315.
- Gu, Y., Tamura, M., Nakagawa, Y., Nakao, K., Suzuki, K., & Tomishige, K. (2021). Direct synthesis of polycarbonate diols from atmospheric flow CO₂ and diols without using dehydrating agents. *Green Chemistry*, 23(16), 5786–5796.
- Huang, J., Worch, J. C., Dove, A. P., & Coulembier, O. (2020). Update and Challenges in Carbon Dioxide-Based Polycarbonate Synthesis. In *ChemSusChem* (Vol. 13, Issue 3, pp. 469–487). Wiley-VCH Verlag.
- Manvirri, R., Keshu, & Uma, S., 2022. Green nanomaterials: An overview. *Green Functionalized Nanomaterials for Environmental Applications*. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823137-1.00026-9>.
- Masazumi T. et al. 2016. Direct Copolymerization of CO₂ and Diols. *Scientific Reports*. Doi: 10.1038/srep24038.
- NCBI. 2022. Adverse Effects. 2-Cyanopyridine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2-Cyanopyridine>.
- Qin, Y., Wang, X. 2019. Conversion of CO₂ into Polymers. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series*. Springer, New York, NY.
- Schuler, M.L. & Kargi, F. 2002. *Bioprocess Engineering Basic Concepts*. 2nd Edition. Prentice Hall PTR.
- Segneanu, A., Gozescu, I., Dabici, A., Sfirloaga, P., & Szabadai, Z. (n.d.). *Organic Compounds FT-IR Spectroscopy*. Retrieved June 19, 2022, from <https://cdn.intechopen.com/pdfs/37659.pdf>
- Song, K. 2017. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Interphase characterization in rubber nanocomposite. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100409-8.00004-8>.
- Song, K. 2017. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). *Interphase characterization in rubber nanocomposite*.
- Tamura, M., Ito, K., Honda, M., Nakagawa, Y., Sugimoto, H., & Tomishige, K. (2016). Direct Copolymerization of CO₂ and Diols. *Scientific Reports*, 6.
- Upadhyay, A.K. et al. 2019. Chapter 21 - Microalgae-Assisted Phyco-Remediation and Energy Crisis Solution: Challenges and Opportunity. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64191-5.00021-3>.
- Yanyan, W. & Donald, J. D. 2018. Carbon dioxide-based functional polycarbonates: Metal catalyzed copolymerization of CO₂ and epoxides. *Coordination Chemistry Reviews*.

Yu Gu et al. 2021. Direct synthesis of polycarbonate diols from atmospheric flow CO₂ and diols without using dehydrating agents. Royal Society Of Chemistry. Doi: 10.1039/d1gc01172c.