



Review

Cairan Ionik sebagai Penyerap Gas CO₂

(Ionic Liquid as CO₂ Absorbent)

Yunita Anggraini, Inge Magdalena Sutjahja*

Program Studi Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa No. 10, Bandung, Jawa Barat, 40132, Indonesia

*Corresponding author: im_sutjahja@itb.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.19.2.62225.247-260

Received 18 June 2022, Revised 7 January 2023, Accepted 31 January 2023, Published 30 September 2023

Kata kunci:

cairan ionik (IL);
IL fungsional;
pelarut eutektik
dalam;
penangkapan dan
pemanfaatan
CO₂.

ABSTRAK. Pemanasan global akibat emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂), memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perubahan iklim dan telah menjadi isu penting dalam beberapa tahun terakhir. Penangkapan dan pemanfaatan CO₂ atau CO₂ capture and utilization (CCU) adalah strategi yang efektif untuk mengurangi pemanasan global. Makalah ini bertujuan untuk memberikan gambaran singkat proses penangkapan CO₂ dengan memanfaatkan cairan ionik (*ionic liquid*, IL). IL adalah jenis garam yang terdiri dari kation organik dan anion organik atau anorganik yang memiliki beberapa keunggulan, di antaranya volatilitas yang rendah, stabilitas termal yang cukup baik, tidak mudah korosif, laju degradasi yang rendah, dan biaya regenerasi yang rendah. Kombinasi kation-anion yang tepat membuat IL dapat digunakan sebagai pelarut untuk proses penangkapan CO₂ menggantikan pelarut konvensional berbasis amina. Dalam perkembangan selanjutnya, generasi baru IL fungsional (IL berbasis basa kuat dan asam amino) dan *deep eutectic solvent* (DES) telah diperkenalkan sebagai larutan pengganti IL murni (IL konvensional) dengan keunggulan kapasitas penyerapan CO₂ yang lebih besar, mudah terurai secara alami (*biodegradable*), mudah berinteraksi dengan jaringan hidup, tidak menimbulkan toksisitas (biokompatibel), dan mudah diproduksi dalam skala besar dengan biaya relatif rendah. Selain itu, dengan mempertimbangkan biokompatibilitas DES, pengembangan DES dengan mempertimbangkan aspek biologis menjadi terobosan baru yang menjanjikan sebagai bahan ramah lingkungan. Dalam hal ini DES menyerap CO₂ dari gas buang dan kemudian menyediakannya sebagai sumber nutrisi bagi mikroalga.

Keywords:

ionic liquid (IL);
functional IL;
deep eutectic
solvent;
CO₂ capture and
utilization.

ABSTRACT. An increase in global warming as an impact of greenhouse gases, particularly carbon dioxide (CO₂), has become an important issue in recent years. CO₂ capture and utilization (CCU) are the effective strategy to mitigate global warming. This study briefly described the CO₂ capture process using ionic liquid (IL). IL is a type of salt consisting of organic cations and organic or inorganic anions. IL as a solution in the CO₂ capture process has several advantages, including low volatility, good thermal stability, non-corrosive, low degradation, and low regeneration costs. Using the proper cation and anion, IL acts as an effective solvent for CO₂ capture, replacing amine. In subsequent developments, a new generation of functional IL (strong base and amino acid-based IL) and deep eutectic solvent (DES) has been introduced as a substitute for pure IL (conventional IL) with the advantages of more excellent CO₂ absorption, biodegradable, easy to interact with live tissue, non-toxicity, biocompatible, and easy to produce on a large scale with relatively low cost. In addition, taking into account the biocompatibility of DES, the development of DES by considering the biological aspects is a promising alternative as an environmentally friendly material. In this case, DES absorbs CO₂ from exhaust gases and provides it as a source of nutrition for microalgae.

ISI

PENDAHULUAN.....	248
CAIRAN IONIK (IL) DAN POTENSINYA SEBAGAI PENANGKAP GAS CO ₂	249
METODE PENYERAPAN GAS CO ₂ OLEH IL.....	251
SELEKTIVITAS CO ₂	252
EFEK ANION DAN KATION PADA KELARUTAN DAN VISKOSITAS IL	253
Efek pada Kelarutan	253
Efek pada Viskositas	254
APLIKASI IL DALAM KONVERSI CO ₂ MENJADI PRODUK DENGAN NILAI TAMBAH (<i>VALUE-ADDED PRODUCT</i>).....	254
IL Fungsional dan <i>Deep Eutectic Solvents</i> (DES) untuk Optimasi Gas Rumah Kaca	255
KESIMPULAN.....	256

Cite this as: Anggraini, Y. and Sutjahja, I. M., 2023. Cairan Ionik sebagai Penyerap Gas CO₂. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 19(2), 247-260. <http://dx.doi.org/10.20961/alchemy.19.2.62225.247-260>.



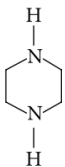
PENDAHULUAN

Pemanasan global sebagai akibat dari emisi gas rumah kaca (misalnya gas CO₂) menjadi isu penting yang memerlukan mitigasi secara signifikan. Berdasarkan hasil laporan khusus yang diterbitkan oleh Panel Antar Pemerintah tentang Perubahan Iklim (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) pada tahun 2018 diketahui bahwa suhu global sudah mencapai 1,1 °C di atas tingkat pra-industri dan diperkirakan akan mencapai 1,5 °C dalam dua dekade mendatang (Allen et al., 2019). Peningkatan suhu global yang terus-menerus akan menyebabkan kerusakan iklim dan memicu serangkaian masalah ekologi dan sosial (Li et al., 2019; Sun et al., 2018).

Penangkapan dan pemanfaatan CO₂ (*CO₂ capture and utilization*, CCU), merupakan langkah alternatif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dalam skala global. Sejumlah teknologi telah dikembangkan untuk CCU, seperti absorpsi, adsorpsi, kriogenik dengan pemisahan membran biofiksasi (Song et al., 2018). Teknologi CCU tidak hanya memiliki manfaat ekologis dalam mengurangi efek rumah kaca, tetapi juga menghasilkan produk yang bernilai ekonomis. Namun, beberapa tantangan dalam pengembangan teknologi CCU terutama untuk aplikasi komersial, seperti intensitas energi, stabilitas material, toksisitas, korosi dan risiko polusi sekunder (Ren et al., 2018; Song et al., 2018).

Jenis pelarut yang lazim digunakan dalam proses penyerapan gas CO₂ adalah dari kelompok amina (Rochelle, 2009). Hal ini berkaitan erat dengan karakteristik dari material jenis amina, yaitu reaktivitas yang tinggi dengan molekul CO₂, stabilitas termal yang tinggi, dan kapasitas penyerapan yang tinggi. Di antara semua kelompok amina, *monoethanolamine* (MEA), *methyl diethanolamine* (MDEA), *diethanolamine* (DEA), *piperazine* (PIPA), *isopropanolamine* (IPA), dan *diethylenetriamine* (DETA) adalah material yang umum digunakan untuk sistem penangkapan CO₂ (Gelles et al., 2020; Torralba-Calleja et al., 2013). Struktur amina ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Struktur kimia material dengan gugus amina yang umum digunakan dalam proses penangkapan CO₂.

Jenis Amina	Struktur	Referensi
MEA	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{OH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	(Torralba-Calleja et al., 2013)
MDEA	$ \begin{array}{c} \text{HO}-\text{H}_2\text{C}-\text{H}_2\text{C}-\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $	(Torralba-Calleja et al., 2013)
DEA	$ \begin{array}{c} \text{HO}-\text{H}_2\text{C}-\text{H}_2\text{C}-\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{H} \end{array} $	(Torralba-Calleja et al., 2013)
PIPA		(Torralba-Calleja et al., 2013)
IPA	$ \begin{array}{c} \text{HO}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{NH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $	(Gelles et al., 2020)
DETA	$ \begin{array}{c} \text{NH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $	(Gelles et al., 2020)

Di sisi lain, penggunaan amina sebagai penyerap gas CO₂ memiliki beberapa kerugian, yaitu biaya konstruksi yang tinggi, laju korosi dari peralatan yang tinggi, degradasi amina oleh SO₂, NO₂, dan O₂ dalam gas buang yang menginduksi laju penyerapan yang tinggi, dan konsumsi energi yang tinggi untuk proses penyerapan pada suhu tinggi (Yu et al., 2012). Kerugian ini terkait dengan sifat inheren dari amina, yaitu tekanan uap tinggi, sifat korosif, dan energi input yang tinggi selama proses regenerasi (Torralba-Calleja et al., 2013). Kerugian lain dari pelarut

amina adalah volatilitasnya yang tinggi sehingga konsumsi energi untuk proses regenerasinya juga cukup tinggi. Hal ini menyebabkan perlunya biaya tambahan untuk seluruh proses penangkapan CO₂. Selain itu, pelarut berbasis amina tidak ramah lingkungan karena sifat volatilitasnya. Amina tidak stabil di alam yang berpotensi menghasilkan bahan beracun berbahaya seperti nitrosamin, nitramin, dan amida. Hal tersebut membuktikan bahwa nitrosamin bersifat karsinogenik dan berbahaya bagi manusia bahkan pada konsentrasi rendah (Torralba-Calleja *et al.*, 2013).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengganti amina dengan pelarut yang lebih unggul, yang memiliki volatilitas lebih rendah, stabilitas termal yang lebih baik, tidak mudah korosif, laju degradasi yang lebih rendah, dan biaya regenerasi yang lebih rendah (Kothandaraman, 2010). Hasil studi eksperimen dan simulasi menunjukkan bahwa cairan ionik (*ionic liquid*, IL) memiliki potensi yang besar sebagai pengganti amina dalam sistem penangkapan gas CO₂ (Lian *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2022). Efektivitas IL dalam menangkap CO₂ lebih baik dibandingkan dengan amina, karena sifatnya yang non-volatil, dan secara umum IL dapat dimodifikasi melalui kombinasi kation/anion yang tepat. Hal ini karena kapasitas kelarutan CO₂ dalam IL konvensional masih tergolong rendah dibandingkan pelarut konvensional berbasis amina (Aghaie *et al.*, 2018). Hal ini terkait interaksi kimia yang kuat antara amina dan CO₂ ($-\Delta H = 80 - 130$ kJ/mol), sedangkan interaksi IL dengan CO₂ menghasilkan gaya yang relatif lemah ($-\Delta H \cong 15$ kJ/mol) (Ramdin *et al.*, 2012). Mayoritas IL yang saat ini digunakan dalam proses penangkapan CO₂ adalah berbasis kation imidazolium atau piridinium yang memiliki toksisitas biologis yang perlu mendapat perhatian (Liu *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

Ionic liquids (ILs) adalah jenis garam yang terdiri dari kation organik dan anion organik atau anorganik (Inamuddin and Asiri, 2020). Keunggulan IL dibandingkan dengan jenis cairan yang lain, antara lain stabilitas kimia dan termal yang baik, tekanan uap yang sangat rendah, dan jendela elektrokimia yang lebar (Gao *et al.*, 2015). Keunggulan lain dari IL yakni memiliki sifat fisik, kimia, dan termal yang relatif mudah diubah sesuai dengan fungsi yang diinginkan memberikan peluang untuk merancang IL yang lebih fungsional dan ramah lingkungan (Anggraini *et al.*, 2022).

Penelitian Blanchard *et al.* (1999) melaporkan bahwa gas CO₂ dapat larut dengan sangat baik dalam IL jenis tertentu. Sejak itu, banyak peneliti yang mempelajari dan mengeksplorasi sifat dan potensi kelarutan berbagai gas dalam IL (Ghandi, 2014; Liu *et al.*, 2021). Namun demikian, IL memiliki kelemahan untuk menyerap CO₂ karena viskositasnya yang tinggi, hal ini karena IL dihasilkan dari proses sintesis dan pemurnian yang kompleks. Secara umum viskositas IL lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut konvensional seperti amina (Ramdin *et al.*, 2012). Karakter ini membuat IL sebagai penyerap CO₂ kurang diminati oleh sektor industri karena laju penyerapan CO₂ yang lebih lambat dibandingkan pelarut konvensional. Pelarut yang memiliki viskositas lebih rendah cenderung lebih disukai untuk tujuan pemisahan karena biaya pemompaan yang lebih rendah dan laju perpindahan massa yang lebih tinggi (Kirchner, 2009). Namun, secara umum viskositas IL dapat dimodifikasi dengan mengatur kombinasi kation dan anion yang tepat. Jenis kation umumnya memiliki dampak yang lebih kecil pada viskositas IL dibandingkan anion, sedangkan panjang rantai alkil kation sebanding dengan viskositas IL (Krupiczka *et al.*, 2015).

Makalah ini membahas penangkapan gas CO₂ oleh IL. Review dimulai dari penjelasan mengenai IL secara umum dan potensinya sebagai penangkap gas CO₂. Proses penangkapan gas CO₂ oleh IL yang terdiri dari metode pra-pembakaran, pasca-pembakaran dan pembakaran *oxyfuel* (*oxyfuel combustion*), selektivitas CO₂, efek anion dan kation pada kelarutan dan viskositas IL sebagai penyerap gas CO₂, dan aplikasi IL dalam konversi CO₂ menjadi produk yang memiliki nilai tambah. Selain itu juga akan dikaji modifikasi IL untuk meningkatkan performa dalam penangkapan gas CO₂ serta tantangan dan prospek kedepannya.

CAIRAN IONIK (IL) DAN POTENSINYA SEBAGAI PENANGKAP GAS CO₂

IL adalah jenis garam yang terdiri dari kation organik dan anion organik atau anorganik dengan suhu leleh di bawah 100 °C (Singh, 2017). Beberapa anion dan kation yang umum digunakan ditunjukkan oleh Tabel 2 dan Tabel 3 yang diperoleh dengan menggunakan *software* ChemDraw. Kation memiliki rantai alkil (R₁, R₂, dst.) sesuai dengan jumlah atom karbon penyusunnya; misalnya rantai alkil dari kation imidazolium yang ditunjukkan pada Tabel 4. Pelarut konvensional menunjukkan titik kritis pada tekanan sekitar 15 MPa sedangkan sistem IL tidak menunjukkan perilaku tersebut. Perilaku sistem CO₂ dalam IL sebanding dengan CO₂ dalam polimer cair yang memiliki berat molekul tinggi, misalnya sistem polietilene glikol dengan berat molekul 600 (PEG 600).

Tabel 2. Anion yang umum digunakan dalam IL. Daftar singkatan ada dalam Tabel S1 dalam Informasi Pendukung.

Anion	Struktur kimia	Anion	Struktur kimia
[Br]	Br^-	[NO ₃]	
[Cl]	Cl^-	[Methide]	
[PF ₆]		[TfA]	
[BF ₄]		[C ₇ F ₁₅ CO ₂]	
[MeSO ₄]		[eFAP]	
[TfO]		[bFAP]	
[DCA]		[ClO ₄]	
[Tf ₂ N] atau [NTf ₂]		[BETI]	
[Ac]		[SCN]	
[CF ₃ BF ₃]		CF ₃ SO ₂ C(CN) ₂	
[TFSAM]		C(CN) ₃	

Tabel 3. Kation yang umum digunakan dalam IL.

Kation	Struktur kimia
Im	
Choline	
Py	
Pyr	
P	
N	

Tabel 4. Rantai alkil pada IL berbasis kation Imidazolium, $[C_n\text{mim}]^+$ kation (n adalah panjang rantai karbon) (Zhang *et al.*, 2009).

N	Singkatan	Struktur kation
2	[emim]	
3	[pmim]	
4	[bmim]	
5	[amim]	
6	[hmim]	
8	[omim]	
10	[dmim]	

METODE PENYERAPAN GAS CO₂ OLEH IL

Skema proses penangkapan CO₂ dapat dilakukan pada tiga tahapan proses pembakaran, yaitu pasca-pembakaran (*postcombustion*), pra-pembakaran (*precombustion*), dan pembakaran *oxyfuel* (*oxyfuel combustion*). Pada proses pasca-pembakaran dan pembakaran *oxyfuel*, bahan bakar (*fuel*) dibakar dengan udara dan oksigen untuk menghasilkan gas buang (*flue gas*), sedangkan pada proses pra-pembakaran, bahan bakar bahan digasifikasi untuk menghasilkan syngas. Panas yang dihasilkan dari pembakaran digunakan sebagai pembangkit listrik.

Metode Paska Pembakaran

Bahan bakar dibakar dalam sistem pemanas dan akan menghasilkan gas buang pada metode ini. Panas yang dihasilkan digunakan untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi, yang memutar turbin uap untuk menghasilkan listrik. Gas buang yang meninggalkan sistem pemanas mengandung sejumlah besar partikel yang kemudian masuk dalam sistem penyaring untuk menghilangkan impuritas. Gas buang yang telah dibersihkan (masih mengandung sekitar 10% – 16% CO₂) akan dilepaskan ke atmosfer kecuali gas CO₂ sehingga akan diperoleh gas CO₂ yang terkonsentrasi.

Metode Pra Pembakaran

Bahan bakar digasifikasi menggunakan oksigen untuk menghasilkan gas sintesis (syngas) dalam metode pra-pembakaran. Syngas yang terdiri dari campuran karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) dimurnikan dalam reaktor WGS. CO akan bereaksi dengan uap untuk menghasilkan H₂ dan CO₂ dalam reaktor tersebut. Selanjutnya, CO₂ ditangkap dan hidrogen dibakar dalam turbin gas untuk menghasilkan energi panas dan listrik.

Metode Pembakaran *Oxyfuel*

Oksigen murni digunakan untuk membakar bahan bakar melalui proses oksidasi sehingga akan dihasilkan gas buang dalam metode pembakaran *oxyfuel*. Panas yang dilepaskan digunakan untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi, yang memutar turbin uap untuk menghasilkan listrik. Gas buang, yang sebagian besar terdiri dari H₂O dan CO₂, disaring untuk membuang bagian abu terbang. Aliran gas buang yang tersisa kemudian didesulfurisasi dan didinginkan untuk menghasilkan embun. Hasilnya adalah aliran CO₂ yang terkonsentrasi (Anheden *et al.*, 2005). Perbedaan mendasar metode ini dengan dua metode lainnya adalah tidak adanya proses penangkapan CO₂, sebaliknya proses yang paling relevan dalam metode ini adalah pemisahan N₂/O₂ sehingga konsentrasi CO₂ yang diperoleh adalah sisa pemisahan tersebut. Keuntungan dan kerugian dari masing-masing metode penangkapan gas CO₂ disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Keuntungan dan kerugian penangkapan gas CO₂ dalam tiga proses pembakaran (Leung *et al.*, 2014).

Penangkapan dalam Tiga Proses Pembakaran	Aplikasi	Keuntungan	Kerugian
Pasca-pembakaran	Pembangkit tenaga batubara dan gas.	Teknologi lebih dulu berkembang dari metode pembakaran lain; dapat dengan mudah dipasang kembali pada pembangkit yang sudah ada.	Konsentrasi CO ₂ yang cukup rendah mempengaruhi efisiensi penangkapan.
Pra-pembakaran	Pembangkit tenaga batubara-gasifikasi.	Konsentrasi CO ₂ yang tinggi meningkatkan efisiensi penyerapan; mudah dipasang kembali pada pembangkit yang sudah ada.	Masalah perpindahan panas dan penggunaan bahan bakar yang kurang efisien; kebutuhan daya yang tinggi untuk regenerasi; pengalaman yang tidak memadai karena masih sedikit pabrik gasifikasi yang saat ini beroperasi; biaya operasi untuk sistem yang tinggi.
Pembakaran <i>oxyfuel</i>	Pembangkit tenaga batubara dan gas.	Konsentrasi CO ₂ yang sangat tinggi meningkatkan efisiensi penyerapan, teknologi pemisahan udara yang cukup canggih; volume gas yang akan diolah cukup sedikit sehingga boiler yang diperlukan juga cukup kecil.	Efisiensi penangkapan yang rendah; produksi O ₂ kriogenik mahal; kemungkinan terjadi korosi.

SELEKTIVITAS CO₂

Proses pembakaran sistem penangkap gas CO₂ menghasilkan gas buang yang mengandung berbagai jenis gas dan pengotor lainnya, sehingga selektivitas CO₂ cukup penting untuk dilakukan (Xu *et al.*, 2014). Anthony *et al.* (2002) melaporkan kelarutan gas dalam IL menggunakan [bmim][PF₆] di suhu 25 °C dimana kelarutan gas

meningkat dalam urutan: $\text{CO}_2 > \text{C}_2\text{H}_4 > \text{C}_2\text{H}_6 > \text{CH}_4 > \text{O}_2 > \text{Ar}$. Hal ini juga di dukung oleh Ramdin *et al.* (2012) dengan menggunakan IL jenis lain yaitu [hmpy][Tf₂N]. Kelarutan gas dalam [hmpy][Tf₂N] pada 25 °C meningkat dengan urutan sebagai berikut: $\text{SO}_2 > \text{CO}_2 > \text{C}_2\text{H}_4 > \text{C}_2\text{H}_6 > \text{CH}_4 > \text{O}_2 > \text{N}_2$.

Menurut Zhang *et al.* (2012), IL konvensional memiliki selektivitas CO₂ yang lebih besar dibandingkan dengan jenis gas (misalnya, CO, H₂, dan O₂) karena momen kuadropol CO₂ yang cukup besar. Pada sistem CO₂/H₂S, selektivitas CO₂ sangat bergantung pada rasio dari CO₂/H₂S dan kelarutan CO₂ menurun dengan meningkatnya H₂S (Shiflett and Yokozeki, 2010). Ramdin *et al.* (2014) melaporkan selektivitas dari CO₂/CH₄ dalam fosfonium dan IL berbasis imidazolium menurun dengan meningkatnya suhu. Hal ini mendorong pentingnya mengoptimalkan selektivitas CO₂ dalam larutan IL dengan mempertimbangkan komposisi gas dan kondisi operasi dari suatu sistem.

EFEK ANION DAN KATION PADA KELARUTAN DAN VISKOSITAS IL

Efek pada Kelarutan

Kelarutan CO₂ dalam IL merupakan faktor penting untuk memilih pelarut yang tepat dan merancang sistem penyerapan yang efisien dalam system penangkapan gas CO₂ (Palma Chilla *et al.*, 2011). Kelarutan gas dalam pelarut diformulasikan menggunakan persamaan Krichevsky-Kasarnovsky (Carroll and Mather, 1992) sesuai Persamaan 1.

$$\ln \ln \frac{f_2(T,P)}{x_2} = p^{\text{sat}} + \frac{V_2^\infty (P - p^{\text{sat}})}{RT} \quad (1)$$

di mana f_2 (dalam satuan mol·m⁻³) adalah fugasitas zat terlarut dalam fase gas pada suhu T (dalam satuan K) dan tekanan P (dalam satuan Pa); x_2 adalah fraksi mol gas yang terlarut dalam pelarut cair (dalam satuan mol·m⁻³); P^{sat} (dalam satuan Pa) menunjukkan tekanan uap saturasi pelarut cair; V_2^∞ (dalam satuan m³·mol⁻¹) mengacu pada volume molar parsial gas pada pengenceran tak terbatas dari pelarut cair; H_2 (dalam satuan mol·m⁻³·Pa⁻¹) adalah konstanta hukum gas Henry dalam pelarut cair; R (dalam satuan J·K⁻¹·mol⁻¹) adalah konstanta gas umum; dan T (dalam satuan K) adalah suhu absolut sistem.

Anion pada IL memiliki peran paling penting dalam penangkapan gas CO₂ dibandingkan kation (Ramdin *et al.* 2012). Hal ini didukung dari hasil eksperimen dan simulasi yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pengaruh anion telah dipelajari secara eksperimen dengan memasang kation [C₂mim] atau [emim] dengan beberapa anion. Kelarutan CO₂ meningkat dengan urutan anion sebagai berikut [BF₄] < [C(CN)₃] < [TFSAM] < [NTf₂] < [CF₃SO₂C(CN)₂] < [CF₃BF₃].

Selain itu, Ramdin *et al.* (2012) melaporkan efek anion pada kelarutan CO₂ dengan memasang kation [bmim] dengan beberapa anion. Hasil yang diperoleh menunjukkan kelarutan CO₂ pada suhu 333 K meningkat dalam urutan anion: [NO₃] < [BF₄] < [DCA] < [PF₆] < [TfO] < [Tf₂N] < [Methide]. Trend ini juga didukung dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh Maiti (2009) dengan menggunakan COSMO-RS, dimana IL berbasis anion fosfonium memiliki kelarutan CO₂ cukup tinggi. Studi tersebut juga menyimpulkan bahwa secara umum IL yang mengandung fluor (anion-fluorinasi) memiliki kelarutan CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan dengan IL tanpa gugus fluor.

Hasil eksperimen efek anion-fluorinasi dipelajari oleh Ramdin *et al.* (2012) untuk IL dengan kation [bmim]. Kelarutan CO₂ meningkat dengan meningkatnya jumlah gugus fluor dalam anion. Kelarutan meningkat dalam urutan anion sebagai berikut: [BF₄] < [TfO] < [TfA] < [PF₆] < [Tf₂N] < [Methide] < [C₇F₁₅CO₂] < [eFAP] < [bFAP]. Terkait dengan kelarutan IL, konstanta Henry CO₂ dikaitkan dengan entalpi kelarutan CO₂ dalam IL yang menunjukkan bahwa kelarutan yang tinggi terkait dengan sifat eksotermis yang tinggi dari campuran. Selain itu kelarutan CO₂ dalam IL juga dipengaruhi interaksi antarmolekul (elektrostatik, ikatan hidrogen, dan van der Waals). Kontribusi dari masing-masing interaksi ini terhadap kelarutan CO₂ dalam IL menunjukkan bahwa gaya van der Waals memiliki peran primer atau paling dominan dalam hal kelarutan CO₂ dalam IL. Interaksi elektrostatik memiliki kontribusi sekunder, sedangkan ikatan hidrogen menunjukkan kontribusi yang cukup kecil (Naulé and Enkvist, 2009). Kation cholinium, ammonium, imidazolium, pyridinium, pyrrolidinium, dan fosfonium dipasang dengan anion [Tf₂N]. Kation-fluorinasi [C₆H₄F₉mim] menunjukkan kelarutan yang meningkat, meskipun pada tingkat yang lebih rendah dibandingkan anion-fluorinasi (Almantariotis *et al.*, 2010). Selain itu, dengan menggunakan rantai alkil yang panjang pada kation fosfonium dengan R₁, R₂, R₃ = 6 dan R₄ = 14 [P66614] didapati kelarutannya juga meningkat.

Ramdin *et al.* (2012) melaporkan kelarutan CO₂ sedikit meningkat dengan meningkatnya panjang rantai alkil untuk jenis anion yang sama yaitu [Tf₂N]. Pada tekanan tertentu, kelarutan meningkat dengan meningkatnya panjang alkil dalam urutan berikut: [omim] > [hmim] > [pmim] > [bmim] > [emim]. Tren ini juga didukung dari hasil simulasi yang dilakukan oleh Maiti (2009). Hidrogen yang terikat pada posisi C2 (C2–H) dari kation imidazolium bersifat asam (yaitu memiliki muatan positif yang relatif besar), sehingga CO₂ lebih condong terikat pada posisi C2 melalui ikatan hidrogen. Pengaruh sifat keasaman ini telah dibuktikan melalui studi eksperimen dan simulasi (Aki *et al.*, 2004; Cadena *et al.*, 2004). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pergantian proton pada posisi C2 dengan metil (C2–metil atau metilasi) sedikit menurunkan kelarutan CO₂ (Cadena *et al.*, 2004). Hasil eksperimen juga memperkuat hal ini dengan mengacu pada konstanta Henry, dimana semakin kecil nilai konstanta tersebut maka kelarutan gas semakin besar. Hasilnya, kelarutan CO₂ dalam [bmim][PF₆] dan [bmmim][PF₆] pada suhu 298 K adalah 53,4 dan 61,8 bar, yaitu menunjukkan kelarutan dari kation [bmmim] atau secara umum yang mengalami metilasi lebih rendah daripada [bmim] (Cadena *et al.*, 2004).

Efek pada Viskositas

Viskositas dari IL merupakan salah satu parameter fisis yang sangat penting dalam mendesain suatu sistem, karena viskositas yang tinggi menghambat laju perpindahan massa (Weingärtner, 2008). Sebagian besar IL berbentuk seperti gel yang sangat kental. Namun, sifat fisis IL dapat dimodifikasi untuk menghasilkan rentang nilai viskositas yang cukup lebar. Secara umum viskositas IL dipengaruhi oleh suhu, jenis kation dan anion, dan panjang rantai alkil dari kation.

Viskositas IL berkurang dengan meningkatnya suhu (trend naik dengan meningkatnya kebalikan suhu). Beberapa jenis IL, kebergantungan viskositas terhadap suhu dapat diolah menggunakan persamaan Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) (Persamaan 2) (Weingärtner, 2008).

$$\eta = A \exp \exp \left(\frac{B}{T-T_0} \right) \quad (2)$$

dengan η (dalam satuan Pa·s) adalah viskositas; A dan B adalah konstanta yang dapat ditentukan nilainya, sedangkan T_0 (dalam satuan K) merupakan suhu transisi glass yang ideal. Ramdin *et al.* (2012) mempelajari pengaruh kation pada viskositas IL. Kation yang digunakan di antaranya imidazolium, pyridinium, pyrrolidinium, phosphonium dan amonium IL dengan anion yang sama yaitu [Tf₂N] pada 25 °C. Viskositas meningkat dengan urutan kation: imidazolium [hmim] < pyridinium [hmpy] < pyrrolidinium [hmpyr] < phosphonium [P2228] < ammonium [N2228]. Hal krusial lain yang menjadi catatan adalah secara umum sifat fisik IL seperti densitas dan viskositas dipengaruhi oleh jumlah air dan pengotor lain yang ada dalam IL, dalam hal ini data yang ditampilkan adalah data viskositas kering (yaitu kadar air lebih rendah dari 1000 ppm) (Jacquemin *et al.*, 2006).

Viskositas IL meningkat dengan urutan anion: [DCA] < [Tf₂N] < [SCN] < [TfA] < [TfO] < [BF₄] < [BETI] < [NO₃] < [MeSO₄] < [PF₆] < [Ac]. Viskositas IL [bmim][PF₆] yang cukup tinggi dikarenakan IL tersebut bersifat terfluorinasi, seperti halnya untuk anion lain seperti [Tf₂N], [TfO] dan [BF₄]. Viskositas IL pada suhu 25 °C dengan menggunakan beberapa jenis kation untuk anion yang sama [Tf₂N] meningkat dengan meningkatnya panjang rantai alkil untuk semua jenis IL. Di sisi lain, kation dari jenis imidazolium memiliki viskositas yang lebih kecil dibandingkan jenis kation lain. Oleh karena itu, untuk aplikasi tertentu dari IL dimana nilai parameter viskositas sangat penting, maka perlu dipertimbangkan rentang suhu operasional, jenis kation dan anion, serta panjang rantai alkil yang sesuai.

APLIKASI IL DALAM KONVERSI CO₂ MENJADI PRODUK DENGAN NILAI TAMBAH (VALUE-ADDED PRODUCT)

Pengurangan CO₂ memiliki efek penting dalam menjaga keseimbangan iklim dan menghambat emisi gas rumah kaca, karena IL dapat secara efektif menyerap CO₂ dan mengubah distribusi muatan pada permukaan molekul melalui ikatan hidrogen. Hal ini menyebabkan penggunaan IL dalam proses reduksi elektrokimia telah menarik minat yang cukup besar dari para peneliti (Cruz *et al.*, 2018). Iijima *et al.* (2018) melakukan modifikasi elektroda Au dengan IL yang mampu mengubah transfer elektron dalam reaksi reduksi dan mengurangi tegangan berlebih (*overpotential*). Desain eksperimen tersebut memberikan alternatif baru untuk mengurangi konsumsi energi berlebih dalam reaksi. Penggunaan IL yang dicampur dengan elektrolit dapat meningkatkan laju reaksi dalam proses reduksi elektrokimia dari CO₂. Zhang *et al.* (2017) menambahkan IL berbasis kation imidazolium (*1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide*) sebagai zat aditif ke dalam larutan berair. Penggunaan IL tidak hanya

meningkatkan aktivitas reduksi elektrokimia CO₂ menjadi asam format, tetapi juga meningkatkan kelarutan CO₂ dalam larutan dan menghambat reaksi dengan hidrogen.

IL Fungsional dan *Deep Eutectic Solvents* (DES) untuk Optimasi Gas Rumah Kaca

Berdasarkan penjelasan sebelumnya IL konvensional bukanlah pilihan yang menjanjikan untuk proses penangkapan CO₂. Oleh karena itu, untuk mengatasi hal tersebut IL dicampur dengan beberapa pelarut lain yang dikenal sebagai IL fungsional, dengan kemampuan absorpsi kimia yang lebih dominan dibanding absorpsi fisika pada IL konvensional. Amina ditambahkan ke dalam IL konvensional dalam IL fungsional (Zhang *et al.*, 2009). Dalam proses modifikasinya, gugus fungsi filik CO₂ dilekatkan pada IL agar dapat meningkatkan kapasitas penangkapan CO₂ (Gurkan *et al.*, 2010). Tabel 6 menunjukkan ilustrasi perbandingan pelarut IL konvensional, IL fungsional, dan MEA dalam hal tipe absorpsi, viskositas, tekanan uap pada suhu ruang, dan solubilitas CO₂ pada tekanan normal dan suhu tertentu.

Tabel 6. Perbandingan pelarut yang digunakan dalam penangkapan gas CO₂ (Aghaie *et al.*, 2018).

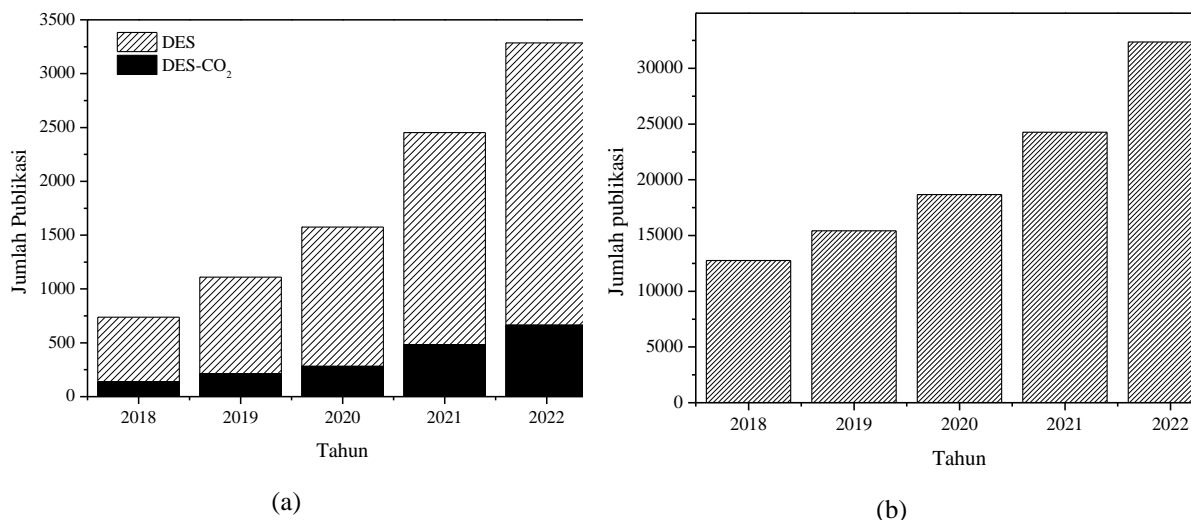
Variabel	Pelarut untuk Penangkapan Gas CO ₂		
	IL Konvensional	IL Fungsional	MEA
Tipe absorpsi	Fisika	Kimia	Kimia
Viskositas (cP)	20 – 2000	50 – 2000	18,98
Tekanan uap pada suhu 25 °C (bar)	1,33×10 ⁻⁹	1,33×10 ⁻⁹	8,5×10 ⁻⁹
Solubilitas CO ₂ pada 1 bar dan 20 – 40 °C (mol/mol)	> 2,51	1,6	50 – 8,5

Generasi baru IL fungsional seperti IL berbasis basa kuat dan asam amino dengan kapasitas penyerapan CO₂ equimolar telah diperkenalkan pada perkembangan selanjutnya (Lian *et al.*, 2021). Atom C dari molekul CO₂ terikat pada atom nitrogen di bagian kation IL dalam IL-basa kuat. Asam amino mengandung asam karboksilat dan gugus amino yang dapat digunakan baik sebagai anion atau kation. IL-asam amino memiliki karakteristik penangkapan karbon yang cukup baik karena adanya dua gugus fungsi (gugus karboksilat dan amino). IL fungsional ini cukup menjanjikan karena lebih mudah terurai secara alami (*biodegradable*), mudah berinteraksi dengan jaringan hidup yang tidak menimbulkan toksisitas (biokompatibel), dan mudah diproduksi dalam skala besar dengan biaya relatif rendah (Shahrom and Wilfred, 2014).

Baru-baru ini, pelarut eutektik dalam (*deep eutectic solvents*, DES) telah diperkenalkan sebagai kelas baru dari IL. DES disintesis melalui kombinasi ikatan hidrogen antara donor ikatan hidrogen atau *hydrogen bond donors* (HBDs) dengan akseptor ikatan hidrogen atau *hydrogen bond acceptors* (HBAs) IL (Liu *et al.*, 2021). DES disebut pelarut eutektik dalam alami atau *natural deep eutectic solvents* (NADES) apabila pembentuknya berupa senyawa metabolit primer, yaitu asam amino, asam organik, gula, atau turunan kolin (Dai *et al.*, 2013). Tabel 7 merangkum beberapa keuntungan dan kerugian dari beberapa pelarut yang digunakan untuk proses penangkapan gas CO₂. DES memiliki keunggulan sifat yang mirip dengan IL konvensional, sehingga potensinya cukup menjanjikan. DES memiliki kelarutan CO₂ yang lebih tinggi, viskositas yang lebih rendah, proses preparasi yang lebih mudah, dan harganya yang lebih murah apabila dibandingkan dengan IL. Selain itu, DES juga bersifat *biodegradable* dan biokompatibel (Adeyemi *et al.*, 2017). Namun, material DES juga memiliki kekurangan diantaranya viskositas cukup tinggi dan bersifat toksik. Sejauh ini belum ada metode yang pasti untuk mengurangi tingkat toksisitas DES. Sebagian besar publikasi melakukan pendekatan sintesis material DES menggunakan material non toksik. Namun demikian, hal ini tidak menjamin material baru yang diperoleh bersifat non toksik, atau justru ada kemungkinan material yang diperoleh bersifat toksik karena campuran material atau sifat toksik diperoleh setelah kombinasi material digunakan untuk penyerapan CO₂ dan H₂S.

Potensi DES sebagai jenis baru dari IL masih sangat besar dikembangkan karena material ini menawarkan beberapa keunggulan yang masih dapat ditingkatkan dan meminimalisir kelemahannya. Gambar 1a menunjukkan grafik publikasi penelitian terkait DES secara umum dan DES untuk penangkapan gas CO₂ yang diperoleh berdasarkan pencarian dengan kata kunci “*Deep Eutectic Solvent Carbon Dioxide*” pada ScienceDirect. Data ini menunjukkan kenaikan jumlah publikasi rata-rata per tahun selama kurun waktu 5 tahun (2018–2022) untuk DES secara umum dan DES untuk penangkap gas CO₂, masing-masing sebesar 42% dan 41%. Hal ini juga didukung dari grafik jumlah publikasi CCU yang diperoleh berdasarkan pencarian dengan kata kunci “*CO₂ Capture Utilization*” pada ScienceDirect (Gambar 1b), dimana jumlah publikasi meningkat dalam kurun waktu 5 tahun terakhir dengan peningkatan rata-rata per tahunnya sebesar 23%. DES dipertimbangkan menjadi salah satu terobosan baru bahan ramah lingkungan karena biokompatibilitas dan aspek biologisnya. DES mampu menyerap

CO₂ dari gas buang dan kemudian menyediakannya sebagai sumber nutrisi bagi mikroalga (konversi mikroalga hibrid). Saat ini beberapa penelitian berfokus pada hibridisasi DES dengan adsorpsi, membran, katalisis, dll. (Lian *et al.*, 2021).



Gambar 1. Jumlah publikasi sains dalam 5 tahun terakhir (2018 – 2022) untuk (a) DES dan DES untuk penangkapan CO₂ dan (b) CCU berdasarkan pencarian di ScienceDirect.

DES mampu menyerap CO₂ baik secara kimia (melalui fungsionalisasi atau penambahan larutan lain dalam DES) maupun secara fisika (melalui pengaturan pasangan kation-anion). Menurut Sarmad *et al.* (2016), sebagian besar DES konvensional (DES tanpa campuran pelarut lain) menyerap CO₂ secara fisika. Di sisi lain, DES fungsional (DES yang dicampur dengan beberapa pelarut lain) melalui penyerapan kimia dipercaya meningkatkan kelarutan CO₂ dibandingkan dengan DES konvensional. Misalnya kelarutan CO₂ dalam DES berbasis amina yaitu ChCl-DEA yang lebih tinggi dibandingkan DES konvensional (Adeyemi *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2017). Namun penyerapan kimia DES berbasis amina membutuhkan proses regenerasi yang cukup kompleks dan belum banyak studi yang melaporkan. Hal ini masih membuka peluang besar penelitian terkait regenerasi DES berbasis amina atau berbasis absorbent lain. Di sisi lain, pendekatan matematis dan simulasi diharapkan dapat membantu menyediakan formulasi baru pada material DES, diantaranya terkait pemilihan material, proses design dan optimasi, sekaligus analisis toksisitas untuk optimasi DES sebagai material penyerap CO₂ yang ramah lingkungan. Sebagai akhir dari makalah review ini, Tabel 7 merangkum beberapa keuntungan dan kerugian dari beberapa pelarut yang digunakan untuk proses penangkapan gas CO₂.

Tabel 7. Keuntungan dan kerugian beberapa pelarut untuk sistem penangkapan gas CO₂ (Lian *et al.*, 2021).

Jenis pelarut	Keuntungan	Kerugian
MEA	Harganya murah.	Mudah menguap, korosi, konsumsi energi yang sangat tinggi
IL Konvensional	Tidak mudah menguap, tidak korosif, solubilitasnya tinggi, konsumsi energi cukup kecil.	Bersifat toksik, viskositas yang tinggi, harga relatif mahal.
DES	Tidak mudah menguap, tidak korosif, solubilitasnya tinggi, harganya murah, mudah terurai secara alami.	Viskositas cukup tinggi namun masih lebih rendah dibanding IL konvensional, bersifat toksik.

KESIMPULAN

Cairan ionik (*ionic liquid*, IL) adalah jenis garam yang tersusun dari kation organik dan anion organik/inorganik. Keunggulan IL dibandingkan pelarut konvensional seperti amina adalah memiliki volatilitas lebih rendah, stabilitas termal yang lebih baik, tidak mudah korosif, laju degradasi yang lebih rendah, dan biaya regenerasi yang lebih rendah. Keunggulan tersebut memungkinkan IL untuk digunakan dalam proses penangkapan gas rumah kaca (terutama CO₂) menggantikan pelarut amina. Proses penangkapan CO₂ secara umum dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu pra-pembakaran, pasca-pembakaran, dan pembakaran *oxyfuel*. Di antara tahapan ini,

penangkapan pada tahapan pasca-pembakaran paling banyak digunakan dalam skala industri karena dan peralatan yang ada mudah di pasang kembali sehingga mengurangi biaya regenerasi. Kelarutan dan viskositas merupakan parameter yang paling penting dalam penangkapan CO₂.

Efek anion pada kelarutan dan viskositas menunjukkan kelarutan dan viskositas meningkat dengan meningkatnya jumlah gugus fluor dalam anion. Hal ini disebabkan adanya gaya interaksi antarmolekul (elektrostatik, ikatan hidrogen, dan gaya van der Waals) dimana gaya van der Waals berperan paling dominan. Pengaruh kation pada kelarutan terbilang cukup kecil dan hanya terbatas pada kation yang mengandung gugus fluor yang memiliki kelarutan sedikit meningkat. Di sisi lain pengaruh kation pada viskositas menunjukkan ammonium memiliki viskositas yang paling tinggi sedangkan imidazolium memiliki viskositas yang paling rendah. Efek panjang rantai alkil menunjukkan bahwa kelarutan dan viskositas meningkat seiring dengan meningkatnya panjang rantai tersebut. Meskipun potensi IL dapat meningkat secara signifikan melalui pengaturan pasangan kation-anion, namun masih cukup banyak tantangan untuk menjadi bahan generasi baru yang lebih ramah lingkungan dan tidak bersifat toksik.

Perkembangan terbaru menunjukkan potensi IL fungsional dan DES sebagai alternatif untuk IL dengan keunggulan kelarutan CO₂ yang tinggi, biaya rendah, proses preparasi yang mudah, biokompatibilitas, dan biodegradasi yang baik. Namun demikian, masih perlu usaha untuk meningkatkan efektivitas penyerapan CO₂. Beberapa hal yang menjadi potensi untuk dikembangkan ke depannya diantaranya: (1) Studi material lain yang dapat di kombinasi dengan DES untuk meningkatkan performa penyerapan CO₂, (2) Studi regenerasi DES berbasis amina atau berbasis pelarut lain, (3) Pendekatan matematis dan simulasi komputer diharapkan dapat membantu menyediakan formulasi baru pada material DES diantaranya dapat membantu terkait pemilihan material, proses design dan optimasi, sekaligus analisis toksisitas untuk optimasi DES sebagai material penyerap CO₂ yang ramah lingkungan.

INFORMASI PENDUKUNG

Informasi Tambahan (*Supplementary Information, SI*) artikel ini dapat dilihat pada tautan <https://jurnal.uns.ac.id/alchemy/editor/downloadFile/62225/225239>.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

YA: Analisis Data, Penulisan Draf Manuskrip, Konseptualisasi, Metodologi, Visualisasi; IM: Konseptualisasi, Validasi, Supervisi, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah memberikan beasiswa PMDSU Batch 4 untuk salah satu pengarang artikel ini Y. A. sebagai mahasiswa Doktoral Fisika FMIPA ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeyemi, I., Abu-Zahra, M.R.M., and Alnashef, I., 2017. Novel Green Solvents for CO₂ Capture, *Energy Procedia*, 114, 2552–2560. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1413>.
- Aghaie, M., Rezaei, N., and Zendejboudi, S., 2018. A systematic Review on CO₂ Capture with Ionic Liquids: Current Status and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 502–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.004>.
- Aki, S.N.V.K., Mellein, B.R., Saurer, E.M., and Brennecke, J.F., 2004. High-Pressure Phase Behavior of Carbon Dioxide with Imidazolium-Based Ionic Liquids. *Journal of Physical Chemistry B*, 108, 20355–20365. <https://doi.org/10.1021/jp046895+>.
- Allen, M.R., Dube, O.P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., and Zickfeld, K., 2018. Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A.,

- Moufouma-Okia., W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnay, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 49–92. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.003>.
- Almantariotis, D., Gefflaut, T., Pádua, A.A.H., Coxam, J.Y., and Costa Gomes, M.F., 2010. Effect of Fluorination and Size of the Alkyl Side-Chain on the Solubility of Carbon Dioxide in 1-Alkyl-3-Methylimidazolium Bis(Trifluoromethylsulfonyl) Amide Ionic Liquids. *Journal of Physical Chemistry B*, 114, 3608–3617. <https://doi.org/10.1021/jp912176n>.
- Anggraini, Y., Yusuf, A., Wonorahardjo, S., Kurnia, D., Viridi, S., and Sutjahja, I. M., 2022. Role of C2 Methylation and Anion Type on the Physicochemical and Thermal Properties of Imidazolium-Based Ionic Liquids. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(8), 103963. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103963>.
- Anheden, M., Yan, J., and de Smedt, G., 2005. Denitrogenation (or Oxyfuel Concepts). *Oil and Gas Science and Technology*, 60, 485–495. <https://doi.org/10.2516/ogst:2005030>.
- Anthony, J.L., Maginn, E.J., and Brennecke, J.F., 2002. Solubilities and thermodynamic properties of gases in the ionic liquid 1-n-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate. *Journal of Physical Chemistry B*, 106, 7315–7320. <https://doi.org/10.1021/jp020631a>.
- Blanchard, L.A., Hancu, D., Beckman, E.J., and Brennecke, J.F., 1999. Green Processing Using Ionic Liquids and CO₂. *Nature*, 399, 28–29. <https://doi.org/10.1038/19887>.
- Cadena, C., Anthony, J.L., Shah, J.K., Morrow, T.I., Brennecke, J.F., and Maginn, E.J., 2004. Why is CO₂ so Soluble in Imidazolium-Based Ionic Liquids?. *Journal of the American Chemical Society*, 126(16), 5300–5308. <https://doi.org/10.1021/ja039615x>.
- Carroll, J.J., and Mather, A.E., 1992. The System Carbon Dioxide-Water and The Krichevsky-Kasarnovsky Equation. *Journal of Solution Chemistry*, 21, 607–621. <https://doi.org/10.1007/BF00650756>.
- Cruz, H., Jordão, N., Amorim, P., Dionísio, M., and Branco, L.C., 2018. Deep Eutectic Solvents as Suitable Electrolytes for Electrochromic Devices. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6, 2240–2249. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03684>.
- Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G.J., Verpoorte, R., and Choi, Y.H., 2013. Natural Deep Eutectic Solvents as New Potential Media for Green Technology. *Analytica Chimica Acta*, 766, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.12.019>.
- Gao, J., Cao, L., Dong, H., Zhang, X., and Zhang, S., 2015. Ionic Liquids Tailored Amine Aqueous Solution for Pre-Combustion CO₂ Capture: Role of Imidazolium-Based Ionic Liquids. *Applied Energy*, 154, 771–780. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.05.073>.
- Gelles, T., Lawson, S., Rownaghi, A.A., and Rezaei, F., 2020. Recent Advances in Development of Amine Functionalized Adsorbents for CO₂ Capture. *Adsorption*, 26, 50–50. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00151-0>.
- Ghandi, K., 2014. A Review of Ionic Liquids, Their Limits and Applications. *Green and Sustainable Chemistry*, 4. <https://doi.org/10.4236/gsc.2014.41008>.
- Gurkan, B.E., de La Fuente, J.C., Mindrup, E.M., Ficke, L.E., Goodrich, B.F., Price, E.A., Schneider, W.F., and Brennecke, J.F., 2010. Equimolar CO₂ Absorption by Anion-Functionalized Ionic Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 132, 2116–2117. <https://doi.org/10.1021/ja909305t>.
- He, X., and Hägg, M.B., 2012. Membranes for Environmentally Friendly Energy Processes. *Membranes* (Basel), 2, 706–726. <https://doi.org/10.3390/membranes2040706>.
- Iijima, G., Kitagawa, T., Katayama, A., Inomata, T., Yamaguchi, H., Suzuki, K., Hirata, K., Hijikata, Y., Ito, M., and Masuda, H., 2018. CO₂ Reduction Promoted by Imidazole Supported on a Phosphonium-Type Ionic-Liquid-Modified Au Electrode at a Low Overpotential. *ACS Catalysis*, 8, 1990–2000. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b03274>.
- Inamuddin, and Asiri, A.M., 2020. *Nanotechnology-Based Industrial Applications of Ionic Liquids*, Springer Cham, ISBN 978-3-030-44995-7. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44995-7>.
- Jacquemin, J., Husson, P., Padua, A.A.H., and Majer, V., 2006. Density and Viscosity of Several Pure and Water-Saturated Ionic Liquids. *Green Chemistry*, 8, 172–180. <https://doi.org/10.1039/b513231b>.
- Kirchner, B., 2009. Ionic Liquids from Theoretical Investigations. *Topics in Current Chemistry*, 290, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/128_2008_36.
- Kothandaraman, A., 2010. Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison Study. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

- Krupiczka, R., Rotkegel, A., and Ziobrowski, Z., 2015. Comparative Study of CO₂ Absorption in Packed Column Using Imidazolium Based Ionic Liquids and MEA Solution. *Separation and Purification Technology*, 149, 228–236. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2015.05.026>.
- Leung, D.Y.C., Caramanna, G., and Maroto-valer, M.M., 2014. An Overview of Current Status of Carbon Dioxide Capture and Storage Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426–443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>.
- Li, Y., Tao, H., Su, B., Kundzewicz, Z.W., and Jiang, T., 2019. Impacts of 1.5 °C and 2 °C Global Warming on Winter Snow Depth in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 651, 2866–2873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.126>.
- Lian, S., Song, C., Liu, Q., Duan, E., Ren, H., and Kitamura, Y., 2021. Recent Advances in Ionic Liquids-Based Hybrid Processes for CO₂ Capture and Utilization. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 99, 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.034>.
- Liu, Y., Dai, Z., Zhang, Z., Zeng, S., Li, F., Zhang, X., Nie, Y., Zhang, L., Zhang, S., and Ji, X., 2021. Ionic Liquids/Deep Eutectic Solvents for CO₂ Capture: Reviewing and Evaluating. *Green Energy and Environment*, 6, 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.11.024>.
- Liu, Y., Han, W., Xu, Z., Fan, W., Peng, W., and Luo, S., 2018. Comparative Toxicity of Pristine Graphene Oxide and Its Carboxyl, Imidazole or Polyethylene Glycol Functionalized Products to Daphnia Magna: A Two Generation Study. *Environmental Pollution*, 237, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.021>.
- Ma, C., Sarmad, S., Mikkola, J.P., and Ji, X., 2017. Development of Low-Cost Deep Eutectic Solvents for CO₂ Capture. *Energy Procedia*, 142, 3320–3325. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.464>.
- Maiti, A., 2009. Theoretical Screening of Ionic Liquid Solvents for Carbon Capture. *ChemSusChem*, 2. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900086>.
- Naucler, T., and Enkvist, P., 2009. Pathways to A Low-Carbon Economy: Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, McKinsey & Company.
- Palma Chilla, L.O., Lazzús, J.A., and Pérez Ponce, A.A., 2011. Particle Swarm Modeling Of Vapor-Liquid Equilibrium Data Of Binary Systems Containing CO₂ + Imidazolium Ionic Liquids Based On Bis[(Trifluoromethyl)Sulfonyl]Imide Anion. *Journal of Engineering Thermophysics*, 20, 487–500. <https://doi.org/10.1134/S1810232811040126>.
- Ramdin, M., Amplianitis, A., Bazhenov, S., Volkov, A., Volkov, V., Vlugt, T.J.H., and de Loos, T.W., 2014. Solubility of CO₂ and CH₄ in ionic liquids: Ideal CO₂/CH₄ selectivity. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53, 15427–15435. <https://doi.org/10.1021/ie4042017>.
- Ramdin, M., de Loos, T.W., and Vlugt, T.J.H., 2012. State-Of-The-Art of CO₂ Capture with Ionic Liquids. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51, 8149–8177. <https://doi.org/10.1021/ie3003705>.
- Ren, S., Hou, Y., Zhang, K., and Wu, W., 2018. Ionic liquids: Functionalization and Absorption of SO₂. *Green Energy and Environment*, 3, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2017.11.003>.
- Rochelle, G.T., 2009. Amine Scrubbing for CO₂ Capture. *Science*, 325, 1652–1654. <https://doi.org/10.1126/science.1176731>.
- Sarmad, S., Xie, Y., Mikkola, J.P., and Ji, X., 2016. Screening of Deep Eutectic Solvents (Dess) as Green CO₂ Sorbents: from Solubility to Viscosity. *New Journal of Chemistry*, 41, 290–301. <https://doi.org/10.1039/C6NJ03140D>.
- Shahrom, M., and Wilfred, C.D., 2014. Synthesis and Thermal Properties of Amino Acids Ionic Liquids (AAILS). *Journal of Applied Sciences*, 14, 1067–1072. <https://doi.org/10.3923/jas.2014.1067.1072>.
- Shiflett, M.B., and Yokozeki, A., 2010. Separation of CO₂ and H₂S Using Room-Temperature Ionic Liquid [bmim][PF₆]. *Fluid Phase Equilibria*, 294, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2010.01.013>.
- Singh, K., 2017. Ionic Liquids: An Emerging Tool for an Improved Organic Synthesis. *MOJ Bioorganic & Organic Chemistry*, 1, 2016–2017. <https://doi.org/10.15406/mojboc.2017.01.00007>.
- Soares, B. F., Nosov, D. R., Pires, J. M., Tyutyunov, A. A., Lozinskaya, E. I., Antonov, D. Y., Shaplov, A. S., and Marrucho, I. M., 2022. Tuning CO₂ Separation Performance of Ionic Liquids through Asymmetric Anions. *Molecules*, 27(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/molecules27020413>.
- Song, C., Liu, Q., Ji, N., Deng, S., Zhao, J., Li, Y., Song, Y., and Li, H., 2018. Alternative Pathways for Efficient CO₂ Capture by Hybrid Processes—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 215–231. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.040>.
- Sun, H., Wang, A., Zhai, J., Huang, J., Wang, Y., Wen, S., Zeng, X., and Su, B., 2018. Impacts of Global Warming of 1.5 °C and 2.0 °C on Precipitation Patterns in China by Regional Climate Model (COSMO-CLM). *Atmospheric Research*, 203, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.024>.

- Torralba-Calleja, E., Skinner, J., and Gutiérrez-Tauste, D., 2013. CO₂ Capture in Ionic Liquids: A Review of Solubilities and Experimental Methods. *Journal of Chemistry*, 2013, 473584. <https://doi.org/10.1155/2013/473584>.
- Wan, R., Xia, X., Wang, P., Huo, W., Dong, H., and Chang, Z., 2018. Toxicity of Imidazoles Ionic Liquid [C16mim]Cl To Hepg2 Cells. *Toxicology in Vitro*, 52, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2018.05.013>.
- Weingärtner, H., 2008. Understanding Ionic Liquids at The Molecular Level: Facts, Problems, and Controversies. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47, 654–670. <https://doi.org/10.1002/anie.200604951>.
- Xia, X., Wan, R., Wang, P., Huo, W., Dong, H., and Du, Q., 2018. Toxicity of Imidazoles Ionic Liquid [C16mim]Cl to Hela cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.022>.
- Xu, G., Liang, F., Yang, Y., Hu, Y., Zhang, K., and Liu, W., 2014. An Improved CO₂ Separation and Purification System Based on Cryogenic Separation and Distillation Theory. *Energies*, 7, 3484–3502. <https://doi.org/10.3390/en7053484>.
- Yu, C.H., Huang, C.H., and Tan, C.S., 2012. A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 745–769. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>.
- Zhang, C., Du, Z., Wang, Jinhua, Wang, Jun, Zhou, T., Li, B., Zhu, L., Li, W., and Hou, K., 2018. Exposed Zebrafish (Danio Rerio) to Imidazolium-Based Ionic Liquids with Different Anions and Alkyl-Chain Lengths. *Chemosphere*, 203, 381–386. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.178>.
- Zhang, S., Lu, X., Zhou, Q., Li, X., Zhang, X., and Li, S. 2009. Ionic Liquid Physicochemical Properties, Library of Congress Catalogue-in Publication Data, United Kingdom.
- Zhang, X., Zhao, Y., Hu, S., Gliège, M.E., Liu, Y., Liu, R., Scudiero, L., Hu, Y., and Ha, S., 2017. Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Formic Acid in Ionic Liquid [Emim][N(CN)₂]/Water System. *Electrochimica Acta*, 257, 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.06.112>.
- Zhang, Xiangping, Zhang, Xiaochun, Dong, H., Zhao, Z., Zhang, S., and Huang, Y., 2012. Carbon Capture with Ionic Liquids: Overview and Progress. *Energy and Environmental Science*, 5, 6668–6681. <https://doi.org/10.1039/c2ee21152a>.
- Zhang, Y., Zhang, S., Lu, X., Zhou, Q., Fan, W., and Zhang, X.P., 2009. Dual Amino-Functionalised Phosphonium Ionic Liquids for CO₂ Capture. *Chemistry - A European Journal*, 15, 3003–3011. <https://doi.org/10.1002/chem.200801184>.
- Zheng, S., Zeng, S., Li, Y., Bai, L., Bai, Y., Zhang, X., Liang, X., and Zhang, S., 2022. State of the Art of Ionic Liquid-Modified Adsorbents for CO₂ Capture and Separation. *AIChE Journal*, 68. <https://doi.org/10.1002/aic.17500>.