

## Peranan Matahari Muda yang Malap dalam Kimia Pra-Biotik: Dari Perspektif Kimia tentang Polimerisasi Pra-Biotik

(The Role of the Faint Young Sun in Prebiotic Chemistry: A Chemical Perspective on Prebiotic Polymerization)

Navaniswaran Tharumen<sup>a</sup>, Mahendran Sithamparam<sup>a</sup>, Nirmell Saththiyasilan<sup>a</sup>, Siti Aminah Bahari<sup>a</sup>, Puvaneswaran Chelvanathan<sup>b</sup>, Jalifah Latip<sup>c</sup>, Afiffuddin Husairi Mat Jusoh Hussain<sup>a,d</sup>, Mardina Abdullah<sup>a</sup> & Kuhan Chandru<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Pusat Sains Angkasa, Institut Perubahan Iklim, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>b</sup>Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>c</sup>Jabatan Sains Kimia, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>d</sup>Pusat Pengajian Citra Universiti, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

\*Corresponding author: [kuhan@ukm.edu.my](mailto:kuhan@ukm.edu.my)

Received 13 September 2023, Received in revised form 16 February 2024

Accepted 15 March 2024, Available online 30 May 2024

### ABSTRACT

*The faint young sun (FYS) was introduced as a paradox by prominent astronomer Carl Sagan dan George Mullen. This paradox posits that the luminosity of the sun 4.6 billion years ago (when it came into existence) was less than 30% of its current luminosity. The variation in solar radiance might have facilitated the Origin of Life (OOL) on Earth by influencing prebiotic chemistry, especially in the formation of prebiotic polyester. Polyester, synthesized from alpha hydroxy acids (aHAs), serves as a model studied as a framework that facilitates OOL. Studies indicate that polyester gels can form from dehydration reactions of aHAs in wet-dry cycles, potentially initiating prebiotic life. Moreover, various investigations have demonstrated that ultraviolet UV light has been known to initiate prebiotic chemical reactions, as well as produce polyester. However, experiments have been done, but none has truly explored broadband light from the FYS. Furthermore, prebiotic polymerization induced by FYS has not been shown. In this paper, we will discuss about FYS, some research conducted regarding prebiotic reactions induced by UV light, and the prospects of how FYS broadband light might be beneficial for prebiotic polymerization involving polyester.*

*Keywords: Faint Young Sun; Broadband of light; origins of life; gels; polyesters*

### ABSTRAK

*Matahari muda yang malap (MMM) diperkenalkan sebagai paradoks oleh ahli astronomi yang ternama, Carl Sagan dan George Mullen. Paradoks ini menyatakan bahawa keamatan matahari, pada 4.6 bilion tahun yang lalu (matahari ketika wujudnya), kurang 30% keamatan matahari jika dibandingkan pada masa kini. Perbezaan keamatan matahari mungkin memangkinkan asal usul kehidupan (AUK) di permukaan bumi melalui mempengaruhi kimia pra-biotik, terutama dalam pembentukan poliester pra-biotik. Poliester, yang disintesis daripada asid hidroksi alfa (aHAs), merupakan model yang dikaji membolehkan AUK. Kajian menunjukkan bahwa jel poliester dapat terbentuk daripada tindak balas dehidrasi aHAs menggunakan kitaran basah dan kering, berpotensi memulai kehidupan pra-biotik. Pelbagai penyelidikan telah membuktikan bahawa cahaya ultra ungu (UV) boleh mencetuskan tindak balas kimia untuk menghasilkan poliester. Namun, prospeknya dalam cahaya dengan spektrum yang luas (CSL) daripada MMM tidak dibincangkan. Selain itu, peranan MMM dalam pempolimeran/kadar degradasi poliester pra-biotik juga tidak*

ditunjukkan. Di dalam kertas jurnal ini, kami akan membicarakan tentang paradoks MMM, beberapa penyelidikan yang telah dilakukan berhubung dengan tindak balas pra-biotik yang disebabkan oleh cahaya UV, dan prospeknya tentang bagaimana CSL daripada MMM mungkin berguna untuk pempolimeran pra-biotik yang melibatkan poliester

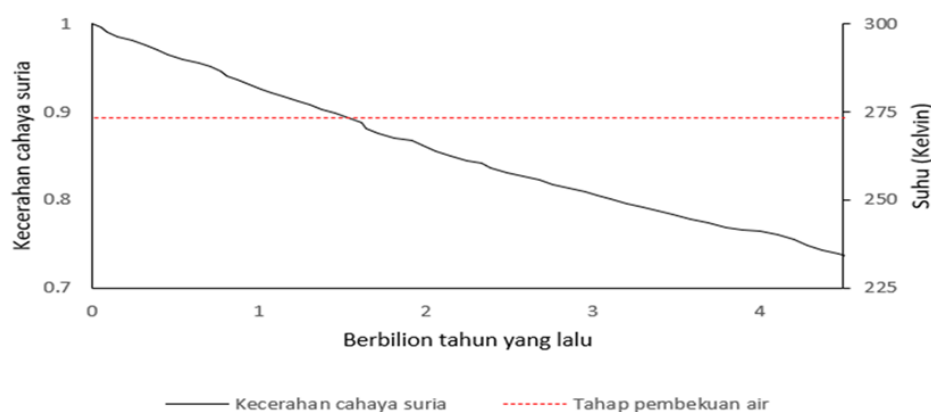
**Kata kunci:** Matahari muda yang malap (MMM); Cahaya dengan spectrum yang luas (CSL); Asal Usul Kehidupan (AUK); Poliester

#### PENGENALAN KEPADA MATAHARI MUDA YANG MALAP (MMM)

Matahari adalah sumber tenaga utama dalam sistem suria. Matahari telah muncul sekitar 4.6 bilion tahun yang lalu (*gigayears ago, Gya*) (G.Kopp 2018). Ia merupakan sejenis bintang kerdil kuning (*yellow dwarf*) dan merupakan bintang urutan utama (*main sequence*) yang agak kecil. Ia juga dikategorikan sebagai bintang jenis "G" mengikut pancaran spektrumnya. Beratnya ialah  $1.99 \times 10^{30}$  kg dan radius bentuk sferanya lebih kurang 695,700 km (Fraknoi et al. 2023). Hipotesis oleh Carl Sagan dan George Mullen berkaitan dengan matahari muda yang malap (MMM), atau *the faint young sun* menyatakan bahawa keamatan matahari telah berubah sepanjang evolusinya di alam semesta. Tahap keamatan fotosfera berkurangan sekitar 30% pada 4.6 Gya berbanding dengan tahap keamatan pada masa kini (Siess et al. 2000). Namun, keamatan matahari akan meningkat sebanyak 1% setiap 100 juta tahun. Dengan ini, dalam 1.6 juta tahun dari sekarang, keamatan matahari akan meningkat ke paras yang boleh menghapuskan kehidupan di Bumi iaitu 2.2 keamatan solar, L (Taylor 2012).

MMM dan keberadaan air di Bumi awal boleh diramalkan menggunakan keamatan matahari yang rendah (Donn 1965). Penemuan ini menyebabkan para pengkaji mula mengkaji hubungan antara penurunan keamatan

matahari dan proses pembentukan glasier di Bumi pada 4 Gya (Budyko 1969; Sellers 1969). Namun demikian, kajian-kajian ini lebih tertumpu kepada glasiasi Pleistosen dan tidak mengambil kira iklim Bumi awal (Budyko 1969; Sellers 1969). Kajian berkenaan iklim dan pengaruh keamatan MMM terhadap atmosfera awal di Zuhrah dikaji oleh Pollack (1971) dan diikuti oleh Sagan & Mullen (1972) yang lebih tertumpu kepada kesan-kesan paradoks MMM pada Bumi awal. Mereka menyatakan bahawa radiasi yang dikeluarkan oleh MMM, dipancarkan ke Bumi awal, tidak mencukupi untuk mengelakkan suhu purata Bumi daripada jatuh ke bawah takat pembekuan air. Hal ini turut disokong oleh Feulner (2012) di mana beliau menyatakan, kira-kira dari 3.5 Gya (awal zaman Arkean) hingga 4 Gya (akhir zaman Hadean), MMM mengeluarkan radiasi rendah yang mempunyai sumber tenaga yang kurang. Hal ini sepatutnya perlu menyebabkan semua air di permukaan bumi menjadi beku ( $\sim 18^\circ\text{C}$ ), tetapi terdapat bukti yang kukuh menunjukkan bahawa kemunculan kehidupan di Bumi pada masa itu tetap berlaku (Rajah 1), di mana, suhu bumi mestilah melebihi  $0^\circ\text{C}$  yang memastikan tindak balas kimia pra-biotik boleh berlaku (Kasting & Howard 2006). Definasi tindak balas kimia pra-biotik ialah, proses kimia yang berlaku sebelum kehidupan bermula di bumi atau/dan proses-proses kimia yang "berpandukan" evolusi kimia ke arah kehidupan biologi di Bumi (Mariscal et al. 2019).



RAJAH 1. Graf diatas menggambarkan MMM. Garisan terputus-putus menunjukkan tahap pembekuan air di Bumi iaitu 273.15K ( $0^\circ\text{C}$ ). MMM mengeluarkan kecerapan cahaya suria yang rendah sehingga semua air permukaan di Bumi beku pada 3.5 hingga 4 Gya lalu. (Graf dilukis semula daripada Kasting & Ono (2006))

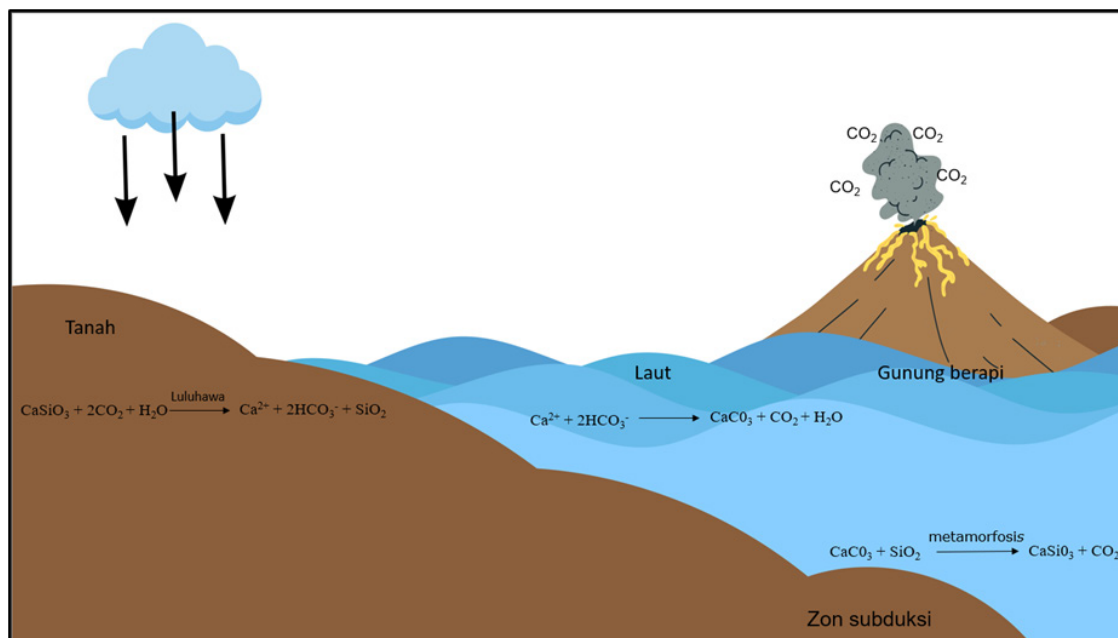
Sagan dan Mullen membincangkan implikasi paradoks MMM melalui bukti geologi yang mempunyai kepentingan bagi kehidupan awal daripada sejarah Bumi awal. Mereka mencadangkan bahawa jumlah gas rumah hijau, iaitu, ammonia ( $\text{NH}_3$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan metana ( $\text{CH}_4$ ), yang lebih tinggi menyumbang kepada pemanasan Bumi awal yang diperlukan untuk menggantikan kepanasan yang kurang akibat MMM pada peringkat awal (Sagan & Chyba 1997; Sagan & Mullen 1972).

$\text{NH}_3$  adalah sejenis gas rumah hijau yang berkesan untuk menyelesaikan paradoks MMM, namun, ia mudah terurai akibat fotokimia dalam atmosfera dan berubah menjadi gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ) dan hidrogen ( $\text{H}_2$ ). Justeru, hal ini mengurangkan kepekatan dalam atmosfera dan keupayaan gas  $\text{NH}_3$  sebagai gas rumah hijau (Kuhn & Atreya 1979; Sagan & Chyba 1997; Sagan & Mullen 1972).

Walaupun bagaimanapun, penyerapan sinar ultraungu (UV) oleh kepekatan bahan organik di altitud yang tinggi yang dihasilkan melalui fotolisis gas  $\text{CH}_4$  mungkin telah melindungi  $\text{NH}_3$  untuk mengawal suhu permukaan Bumi

daripada menjadi beku (Sagan & Chyba 1997). Namun, hasil analisis menggunakan model fotokimia menunjukkan bahawa jumlah sinaran UV yang diserap oleh bahan organik pada altitud yang tinggi berkemungkinan tidak ketara (Abelson 1966). Kabus  $\text{NH}_3$  dan  $\text{CH}_4$  hasil daripada fotokimia dengan taburan saiz fraktal boleh membantu dalam mengekalkan suhu permukaan Bumi awal dan mengelakkan pembentukan glasier, justeru membolehkan kehidupan awal muncul di Bumi ini (Pavlov (2001); Wolf (2010)).

Selain  $\text{NH}_3$  dan  $\text{CH}_4$ , wap air juga adalah gas rumah hijau yang utama dan mempunyai keupayaan menyerap haba yang paling kuat, tetapi ia tidak dapat menyelesaikan paradoks MMM. Hal ini kerana wap air menyebabkan pengembunan dan menjadi hujan. Oleh itu, tekanan wap tepu yang bergantung hanya pada suhu dan ditentukan oleh gas rumah hijau yang tidak boleh dikondensasikan seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$  (Catling & Zahnle 2020). Justeru,  $\text{CO}_2$  yang ketara adalah penyebab utama dalam peningkatan kesan rumah hijau pada zaman Arkean (*Archea*).



RAJAH 2. Kitaran kalsium inosilikat. Kawalan suap balik (*feedback control*) gas rumah hijau,  $\text{CO}_2$ , adalah satu cara yang penting untuk mengawal suhu permukaan Bumi.

Proses suap balik negatif di mana kadar luluhawa mineral silikat, diikuti oleh pemendapan mineral karbonat, adalah bergantung kepada suhu permukaan, yang seterusnya bergantung kepada tekanan separa  $\text{CO}_2$  melalui kesan rumah hijau (Walker 1981) (Rajah 2). Berdasarkan Rajah 2, jika suhu global dan kepekatan  $\text{CO}_2$  menjadi rendah, pengurangan  $\text{CO}_2$  melalui pemendapan atau kadar pengikisan mineral silikat daripada benua dan dasar laut

menjadi perlahan dengan lebih mendadak. Di samping itu, pengeluaran  $\text{CO}_2$  daripada proses geologi (contoh: gunung berapi) akan meningkatkan kepekatan  $\text{CO}_2$  dalam atmosfera, menyebabkan suhu global meningkat semula. Sebaliknya, jika iklim menjadi terlalu panas, peningkatan kadar pemendapan  $\text{CO}_2$  (contoh: hujan) dan pengikisan kalsium inosilikat ( $\text{CaSiO}_3$ ) (contoh: di tanah) akan mengambil gas  $\text{CO}_2$  dari atmosfera, lalu mengurangkan

suhu Bumi (Catling & Zahnle 2020). Pada masa yang sama, bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) dan kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) daripada pengikisan  $\text{CaSiO}_3$  akan bertindak balas di laut. Tindak balas ini akan menghasilkan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dan ia akan mandap di dasar laut. Di zon subduksi pula,  $\text{CaCO}_3$  akan bertindak balas dengan silikat dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) (daripada pengikisan  $\text{CaSiO}_3$ ) dan menghasilkan semula  $\text{CO}_2$ . Suhu purata global pada zaman Arkean iaitu  $0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$  disebabkan oleh luluhawa dasar laut dan suap balik negatif ini, yang akan menyederhanakan iklim Arkean, sahaja tidak boleh menyelesaikan paradoks MMM (Krissansen-Totton, Arney & Catling 2018).

Selain itu, gas  $\text{CH}_4$  juga dicadangkan sebagai gas rumah hijau untuk pemanasan Bumi awal bersama dengan  $\text{CO}_2$  (Charnay et al. 2020).  $\text{CH}_4$  dihasilkan pada Bumi awal melalui proses abiotik seperti serpentinisasi (*serpentinization*) di terowong hidrotermal (*hydrothermal vents*), biogenik daripada organisma methanogen (Urai et al. 2021). Dalam atmosfera Arkean yang anoksia (anoxic), model fotokimia menjangkakan bahawa purata jangka hayat  $\text{CH}_4$  adalah 1,000 kali lebih lama berbanding dengan masa kini di atmosfera. Kepekatan  $\text{CH}_4$  ini menghasilkan kesan rumah hijau yang kuat dengan menyerap sinaran haba pada  $7\ \mu\text{m} - 8\ \mu\text{m}$  dari segi panjang gelombang (Charnay et al. 2020).

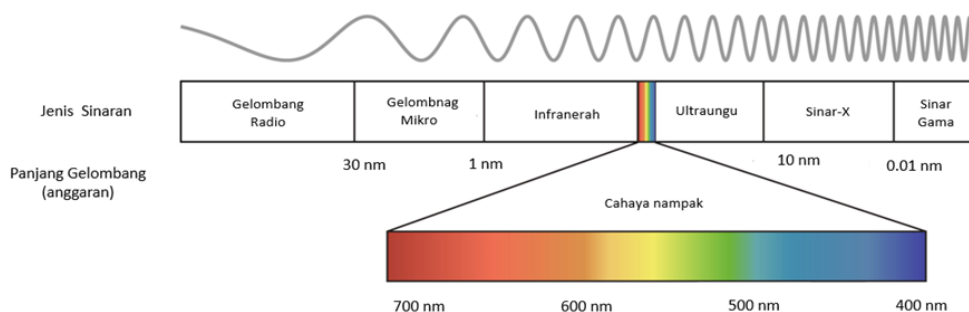
Terdapat beberapa penjelasan yang lain turut dicadangkan untuk menjelaskan paradoks MMM ini, serta beberapa hipotesis juga dicadangkan untuk memastikan Bumi awal tidak beku. Antaranya ialah pemanasan air pasang surut (*tidal heating*) (Heller et al. 2021; Maltese & Mezger 2020), angin suria (*solar wind*) (Shaviv 2003),

perubahan dalam litupan awan, putaran Bumi dan kawasan benua (Feulner 2012) dan keluasan daratan (Charnay et al. 2020). Justeru, faktor-faktor ini dianggap untuk mengatasi radiasi rendah yang dikeluarkan oleh MMM untuk menjadikan Bumi sesuai untuk hidupan atau kemunculannya. Walaubagaimanapun, tiada bukti jelas yang menunjukkan sedemikian.

Secara ringkasnya, ketidakstabilan cuaca/iklim di Bumi awal semasa MMM, mungkin memangkinkan asal usul kehidupan (AUK) di permukaan Bumi. Pada masa yang sama, tindak balas kimia juga mungkin dicetuskan daripada sumber tenaga yang dipindahkan oleh MMM melalui sinaran ultraviolet (UV). Persoalannya ialah bagaimanakah sinaran UV ini memainkan peranan dalam tindak balas kimia yang membolehkan kemunculan AUK? Hal ini merupakan tumpuan utama dan isu yang akan dibincangkan dalam kertas ini.

#### KIMIA PRA-BIOTIK UV DAN POTENSINYA UNTUK POLIMERISASI

Sinaran UV adalah sejenis sinaran elektromagnetik yang mempunyai tenaga dan panjang gelombang yang lebih tinggi daripada cahaya nampak (*visible light*) walaupun mempunyai panjang gelombang yang lebih pendek daripada sinar-X (Rajah 3). Sinaran UV tidak dapat dilihat oleh mata kasar manusia tetapi serangga, seperti lebah kelulut, boleh melihat cahaya UV (Chen et al. 2020). Dari segi astronomi, sinaran UV sering dirujuk sebagai “cahaya hitam” yang dikeluarkan oleh matahari.



RAJAH 3. Spektrum elektromagnetik

Matahari adalah sumber utama sinaran UV dengan spektrum yang penuh dan lengkap. Sinaran ini biasanya boleh dibahagikan kepada UV-A (315–400 nm), UV-B (280–315 nm), dan UV-C (200–280 nm) (Correa et al. 2023). Klasifikasi ini sering digunakan dalam istilah sains Bumi. Sinaran UV-C memiliki tenaga tertinggi dan paling berbahaya bagi makhluk hidup. Namun, sinaran ini hampir keseluruhannya diserap pada masa kini oleh lapisan ozon

dalam atmosfera Bumi dan tidak sampai ke permukaan Bumi (Wei et al. 2023). Sinaran UV-B juga berbahaya dan dapat menyebabkan kulit terbakar jika terdedah kepada cahaya matahari yang berlebihan (Harahap et al. 2022). Pendedahan yang berlebihan dapat meningkatkan risiko kerosakan DNA dan sel dalam organisma (Tanveer et al. 2023). Namun begitu, lebih kurang 80% sinaran UV-B akan diserap oleh lapisan ozon dalam atmosfera Bumi

sebelum sampai ke permukaan Bumi (Correa et al. 2023). Penyerapan sinaran UV-C dan UV-B yang disinari oleh MMM mungkin berbeza berbanding dengan Bumi awal.

Selain daripada kemudaratan bagi kehidupan, terdapat spekulasi bahawa radiasi UV boleh berfungsi sebagai sumber tenaga untuk tindak balas kimia pra-biotik yang terlibat dalam pembentukan bahan kimia (Green, Xu & Sutherland 2021; Rimmer et al. 2021). Kajian-kajian pra-biotik menunjukkan bahawa sinaran UV boleh menyebabkan tindak balas kimia pra-biotik, seperti, asid amino (Nuevo et al. 2008; Powner et al. 2007) nukleotida (Janicki et al. 2018; Patel et al. 2015; Powner et al. 2007,) dan polimer (Mariani et al., 2018).

Dalam polimerisasi yang dicetuskan oleh sinaran UV, monomer digabungkan menjadi polimer dengan adanya fotopengaktif. Ketika fotopengaktif menyerap sinaran UV pada panjang gelombang tertentu, iaitu antara 300 nm hingga 400 nm, ia menghasilkan radikal-radikal bebas. Radikal ini menyebabkan polimerisasi monomer dengan struktur tertentu (Worzakowska, 2021).

Kajian-kajian terkini dalam bidang AUK telah menunjukkan bahawa tindak balas dehidrasi menggunakan kitaran basah dan kering dalam pra-biotik boleh menghasilkan polimer seperti depsiptida (Forsythe et al. 2015), peptida (Yu et al. 2017), dan poliester (Chandru et al. 2018). Poliester telah menjadi model yang menarik dalam kajian AUK kerana: bahan pembentuk ester seperti asid hidroksi alfa ( $\alpha$ HAs) dan asid dikarboksilik atau diol, adalah banyak di Bumi awal dan kemungkinan berlakunya tindak balas kimia pra-biotik adalah tinggi (Chandru et al. 2020, Jia Tz & Chandru.K. 2023).

Penelitian terhadap molekul bukan biologi, seperti poliester, semakin diiktiraf kepentingannya dalam penyelidikan AUK. Molekul-molekul bukan biologi ini dapat berperanan sebagai kerangka yang mengarahkan sistem kimia pra-biotik menuju kepada sistem yang menyerupai kehidupan. Selain itu, ia juga dapat berfungsi sebagai komponen biokimia alternatif dalam kehidupan di luar Bumi, yang mungkin berbeza dari kehidupan di Bumi namun memiliki fungsi serupa seperti pemetakan (*compartmentalization*), metabolisme, atau replikasi.

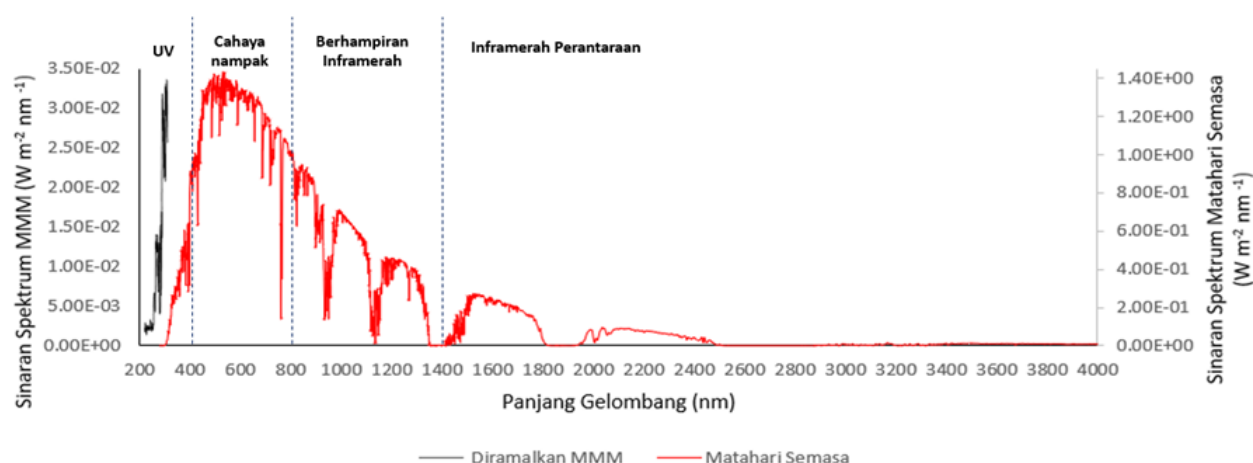
Namun, tenaga daripada sinaran UV untuk polimerisasi poliester masih belum dikaji secara sistematik dalam konteks pra-biotik. Salah satu sebab yang mungkin tidak akan memberi kesan untuk polimerisasi akibat sinaran UV adalah, kumpulan berfungsi (functional group)  $\sim$ OH dan  $\sim$ COOH dalam sesuatu monomer. Sebagai contoh, asid laktik memerlukan radikal  $H^+$  atau  $OH^-$  dalam larutan air untuk memulakan tindak balas kimia. Satu kajian menunjukkan bahawa polimer asid laktik boleh diuraikan oleh gelombang UV, iaitu pada 254 nm (Sefl et al. 2020).

#### PROSPEK UNTUK KIMIA PRA-BIOTIK MENGGUNAKAN CAHAYA SPEKTRUM LEBAR (CSL) MATAHARI MUDA YANG MALAP (MMM)

Impak keamatan MMM terhadap kimia pra-biotik sangat penting untuk dikaji bagi memahami AUK. Penggunaan pancaran sinaran UV oleh matahari pada masa ini digunakan untuk menunjukkan tindak balas kimia pra-biotik berasaskan air dalam pembentukan molekul pra-biotik, seperti gula ribosa dan nukleobes (keduanya adalah pengasas RNA/DNA) (Beckstead et al., 2016) tetapi tidak mengambil kira pengurangan 30% cahaya menyerupai spektrum MMM. MMM hanya dipertimbangkan, pada kawasan spektrum UV yang terbatas, iaitu 254 nm atau 365 nm seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 4 di mana ia menunjukkan ramalan spektrum MMM (Rimmer et al. 2021). Selain itu, menggunakan simulasi MMM membuktikan pembentukan prekursor RNA/DNA seperti hidrogen sianida (HCN), dan nukleobes (Rimmer et al. 2021). Namun, mereka mengabaikan peranan sinaran inframerah (IR) (Rajah 4) yang dapat memanaskan larutan dan perubahan fotoaktiviti bahan organik dalam jangka waktu paparan 24 jam. Nukleobes mempunyai jangka hayat pendek pada suhu yang tinggi, melebihi 50 °C, dibandingkan dengan waktu yang diperuntukan untuk munculnya kehidupan, yang menekankan impak penguraian akibat pemanasan IR (Levy & Miller 1998).

Walaupun mempunyai kelemahan dalam kajian Rimmer et al. dari segi mengkaji menggunakan kawasan gelombang UV yang terbatas di dalam spektrum MMM, ia menunjukkan arah yang tepat dalam mengkaji persekitaran dan paradoks MMM pada zaman Hadean di mana kimia pra-biotik dijangka berlaku (Rajamani & Biondi 2022). Pada zaman Hadean ini, kimia pra-biotik boleh berlaku di banyak persekitaran geologi, contohnya, kolam geoterma (Deamer et al. 2006), terowongan hidrotermal (Bau et al. 2020), gunung berapi (Bada 2023), dan kolam air panas (Saha et al. 2022). Dalam tetapan yang berbeza ini, antara tindak balas kimia pra-biotik ialah pembentukan molekul (seperti gula seperti ribosa dan nukleobasa) metabolisme primitif, dan polimerisasi. Tindak balas ini dan hasilnya amat penting bagi pembentukan/pemulaan AUK.





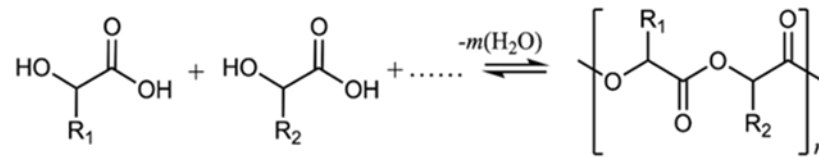
RAJAH 4. Spektrum MMM yang diramalkan (berwarna hitam) (diambil daripada (Rimmer et al. 2021) yang menggunakan  $K_1$  Cati, bintang yang sama dengan matahari muda) dibandingkan dengan spektrum penuh Matahari semasa standard untuk AM 1.5 yang ditakrifkan oleh Persatuan Pengujian dan Bahan Amerika (berwarna merah) (Gueymard 2004). Dalam kajian Rimmer khususnya mengabaikan spektrum seluruh jalur lebar MMM (berwarna hitam) dalam julat  $\sim 380$  nm ke atas, iaitu cahaya nampak, kawasan spektrum IR, dan sebagainya

AUK dikatakan bermula daripada biomolekul yang kemudiannya berkumpul untuk membentuk polimer DNA/RNA dan protin. Namun, baru-baru ini, walaupun kehidupan yang kita tahu (*life as we know it*) menggunakan biomolekul, ini tidak semestinya sama pada masa kehidupan mula muncul di Bumi sekitar 3.5 Gya lalu (Jia & Chandru., 2023). Kajian mereka yang melibatkan polimer bukan biomolekul untuk menunjukkan satu senario kehidupan yang tertumpu di luar Bumi yang alternatif (*exoplanet*) yang mempunyai ruang kimia dan tetapan yang berbeza.

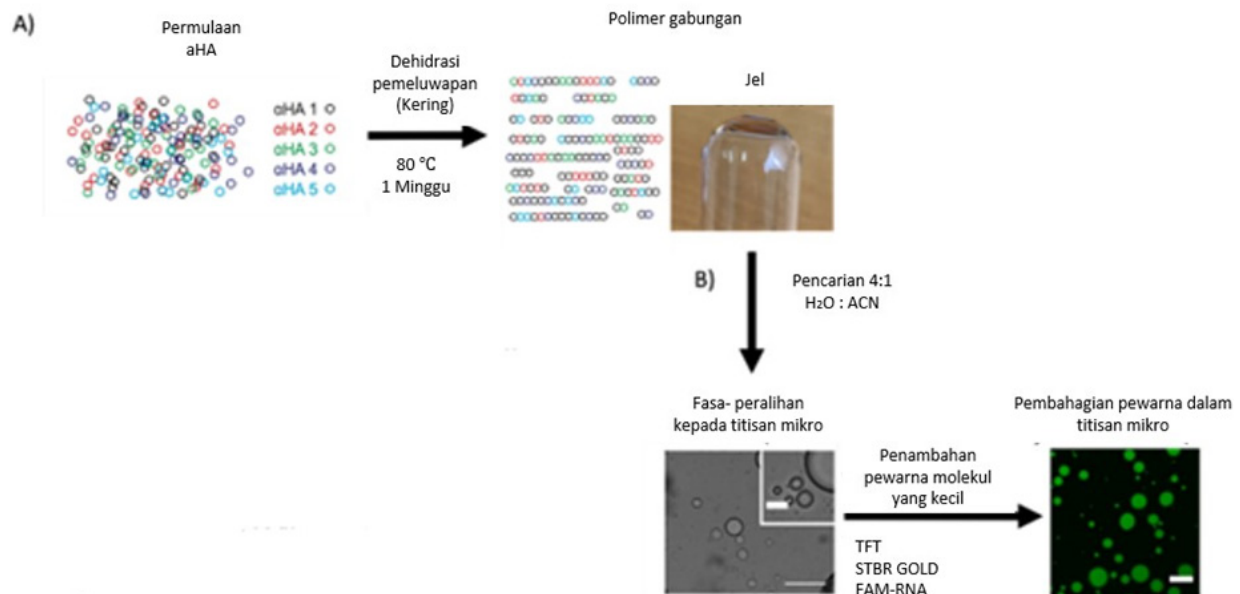
Ruang kimia (*chemical space*) pra-biotik, iaitu lokasi geologi yang dapat menampung semua bahan kimia yang mungkin ada di dalamnya, adalah luas dan mengandungi pelbagai jenis sebatian organik secara semula jadi, kompleks dan tidak dapat dikesan, seperti “kimia berantakan (*messy chemistry*)” (Guttenberg et al. 2017). Hal ini termasuk dalam kajian Miller-Urey, sebatian organik dalam kondrit karbon, polimerisasi HCN, tindak balas formosa, kimia cerobong hidrotermal, dan lain-lain. Terdapat kira-kira  $\sim 14,000 - 50,000$  bilangan bukan biomolekul unik dan beberapa jumlah biomolekul dalam hanya beberapa miligram dapat dikesan daripada meteorit Murchison termasuk  $\alpha$ HAs. Meteorit ini yang merupakan kondrit karbon yang sering digunakan sebagai rujukan untuk kimia pra-biologi. (Schmitt-Kopplin et al. 2010).

$\alpha$ HAs merupakan molekul yang dikaji untuk menghasilkan poliester sebagai rangka yang membolehkan AUK (Chandru et al. 2020). Oleh itu, mengambil kira

kandungan  $\alpha$ HAs dalam ruang kimia pra-biotik yang tinggi, maka boleh dikatakan bahawa molekul-molekul ini boleh membentuk poliester secara spontan (secara termodinamik). Sebagai contoh, dari segi termodinamik, ikatan ester mempunyai kelebihan polimerisasi yang ketara ( $\Delta G = \sim 0$  kcal mol<sup>-1</sup>) dan terbentuk dengan lebih spontan berbanding ikatan peptida ( $\Delta G = +3.5$  kcal mol<sup>-1</sup>) dalam keadaan fisiologi (Chandru et al. 2020). Menurut kajian Chandru dan Jia, hidrasi (kondensasi)  $\alpha$ HAs berlaku dalam kitaran basah dan kering dan menghasilkan jel polimer (Rajah 5) (Chandru et al. 2020). Penggunaan istilah “jel” kerana kajian rheologi awal ke atas poliasid polilaktik menunjukkan bahawa *storage modulus* (kelakuan keadaan pepejal) menguasai *loss modulus* (kelakuan keadaan cecair) sehingga tegasan tekanan bertindak pada tahap yang paling sesuai untuk mengubah kelakuan aliran jel. Walaubagaimanapun tiada data rheologi kuantitatif untuk menyokong perkara ini. Apabila jel ini dicairkan dalam larutan ACN: H<sub>2</sub>O 1:4, jel poliester ini boleh melakukan pengasingan fasa (phase separation), melalui pemisahan fasa cecair-cecair (liquid-liquid phase separation, LLPS), untuk menjadi titisan mikro tanpa membran yang memiripi protosel, seperti sel pra-biotik awal (Chandru, Mamajanov, et al. 2020) (Rajah 6). Titisan mikro ini boleh mengurung pewarna, RNA, protin dan sebatian yang lain di mana hal ini memiripi protosel yang berpotensi untuk memulakan AUK (Rajah 6) (Jia et al. 2019). Protosel adalah struktur yang paling mudah menyerupai sel yang boleh dihasilkan daripada kimia pra-biotik (Gözen et al. 2022.)



RAJAH 5. Dehidrasi kondensasi dengan mudah terjadi antara asid hidroksi alfa yang memiliki rantai samping R1 dan R2 (bagian kiri), menghasilkan pembentukan polimer poliester melalui kondensasi dengan kehilangan molekul air



RAJAH 6. Panel A menunjukkan pembentukan jel polimer pra-biotik (menggunakan 5 jenis aHA untuk membuat poliester) melalui kitaran basah/kering yang meniru kolam geotermia. Panel B menunjukkan fasa jel polimer dipisahkan (melalui pemisahan fasa cecair-cecair) kepada titisan tanpa membran, dan keupayaannya untuk memisahkan pewarna (Tft, SYBR Gold = pewarna fluoresent generik, FAM-RNA = RNA bertanda fluoresent) (Chandru et al. 2018, Jia et al. 2019)

Walaupun konsep AUK yang menggunakan bahan kimia alternatif (yang bukan biomolekul) menjadi satu konsep yang menarik, terdapat banyak perkara yang belum diketahui. Justeru, terdapat banyak peluang kajian yang boleh dibuat secara mendalam. Walaupun poliester konvensional (seperti asid polilaktik (P-LA)), yang digunakan secara meluas dalam pertanian, automotif, pembungkusan (Taib et al. 2023) dan menjadi produk yang dikaji dengan lebih lanjut, terdapat banyak yang tidak diketahui tentang kadar hidrolisis poliester pra-biotik. Berdasarkan hujah termodinamik yang dibincangkan di atas, poliester mungkin lebih mudah terhidrolisis berbanding polipeptida, tetapi kadar hidrolisisnya tidak diketahui. Dengan kitaran siang/malam 6.1 jam pada masa Hadean (Richard Gordon 2021), kadar hidrolisis dan pembentukan molekul daripadanya adalah faktor yang penting dalam persekitaran awal Bumi. Oleh itu, kadar pembentukan poliester mungkin lebih cepat daripada kadar hidrolisisnya. Hal ini akan membolehkan poliester kekal

lebih lama dalam persekitaran yang sama seperti polipeptida.

Namun, salah satu masalah adalah untuk mengetahui faktor yang menentukan degradasi poliester selain daripada hidrolisis. Penerokaan dari segi kadar degradasi ini amat penting kerana teori klasik panspermia berpendapat bahawa “benih kehidupan” boleh dipindahkan melalui meteorit dan menyebarkan kehidupan di antara planet. Kepercayaan bahawa benih kehidupan biologi masih kontroversi and sangat diperdebatan (Sivula 2022). Sebaliknya, Sithamparam et al. (2022) mencadangkan bahawa jika jel poliester yang dihasilkan daripada aHAs mampu bertahan daripada keadaan yang keras di ruang angkasa untuk jangka masa yang lama dan ia boleh masuk ke dalam kawasan berair di sesebuah planet, dan berubah fasa menjadi titisan mikro, ia boleh mendorong evolusi kimia di sesuatu planet baharu itu dan memulakan AUK.

Oleh yang demikian, seperti yang telah disebutkan sebelum ini, kekurangan ozon dalam atmosfera Bumi awal

membenarkan degradasi poliester akibat sinaran UV menjadi lebih teruk berbanding pada masa kini. Kadar degradasi sinaran UV iaitu pada 315 nm (Cañadas et al. 2019) terhadap poliester yang dihasilkan di industri kini, seperti polietilena tereftalat (PET), adalah 110 µm setahun dan mempunyai jangka hayat separa 2.3 tahun (Chamas et al., 2020). Walaubagaimanapun, tiada lagi kajian yang menunjukkan kadar degradasi poliester aHAs dengan menggunakan sinaran UV daripada MMM dengan CSL yang sepenuhnya.

Di dalam kertas ini, memandangkan perkara ini tidak dikaji lagi, kadar degradasi poliester pra-biotik dijangka berlaku dengan lebih pantas jika didedah kepada spektrum UV yang penuh. Hal ini kerana radiasi UV menyebabkan penguraian fotooksidatif yang mengakibatkan pemutusan rantai polimer, menghasilkan radikal bebas, dan mengurangkan berat molekul, serta menyebabkan penurunan sifat mekanikalnya. Bertentangan dengan hal ini, sinaran UV daripada MMM dengan CSL, juga mungkin membolehkan pembentukan poliester kerana larutan monomer yang terdedah kepada sinaran UV akan menghasilkan pemolimeran radikal bebas. Pada masa yang sama, tenaga daripada sinaran UV membolehkan tindak balas dan pembentukan polimer.

Persoalan tentang tindak balas sinaran UV terhadap jel poliester dan monomer aHAs perlu dikaji untuk mengetahui sama ada sinaran UV akan mendegradasi jel atau membentuk jel, masing-masing. Hal ini akan membuka ruang yang lebih luas untuk mengetahui mekanisme kimia pre-biotik berhubung dengan sinaran UV dan perannya dalam AUK.

#### KESIMPULAN

Kami telah menerangkan tentang MMM dan kesannya terhadap bumi primitif sekitar 4.5 Gya, kimia pra-biotik dalam cahaya UV, dan keperluan untuk menggunakan MMM dalam kimia pra-biotik, terutamanya dalam polimer pra-biotik, untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif tentang apa yang mungkin terjadi semasa AUK.

Hipotesis alternatif menggunakan monomer yang bukan biomolekul seperti aHA untuk mendalami AUK di bumi ini adalah titik permulaan sahaja dalam bidang astrobiologi. Pada masa ini, kami sedang menyiasat penyelidikan berfokus pada kajian kesan MMM ke atas poliester.

#### PENGHARGAAN

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada individu-individu berikut atas sumbangan berharga mereka dalam perbincangan awal berkaitan dengan manuskrip ini: Mahendran Sithamparam (UKM), Nirmell Satthiyasilan (UKM), Dr. Siti Aminah Binti Bahari (UKM), Ts. Dr. Puvaneswaran Chelvanathan (UKM), Prof. Madya Dr. Jalifah Latip (UKM), Dr. Afifuddin Husairi Mat Jusoh Hussain (UKM), Prof. Ir. Dr. Mardina Abdullah (UKM), Dr. Kuhan Chandru (UKM) dan Dr. Tony Z. Jia (Earth-Life Science Institute (ELSI), Tokyo Institute of Technology). Kerja ini menerima sokongan daripada Kementerian Pendidikan Tinggi (MoHE) Malaysia di bawah geran FRGS/1/2021/STG04/UKM/02/1.

#### PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

#### RUJUKAN

- Abelson, P. H. 1966. Chemical Events on the Primitive Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 55(6):1365-1372..
- Bada, J. L. 2023. Volcanic Island Lightning Prebiotic Chemistry and the Origin of Life in the Early Hadean Eon. *Nature Communications* 14
- Bau, J. P. T., Villafane-Barajas, S. A., Da Costa, A.C.S., Negrón-Mendoza, A., Colín-García, M. & Zaia, D. a. M. 2020. Adenine Adsorbed onto Montmorillonite Exposed to Ionizing Radiation: Essays on Prebiotic Chemistry. *Astrobiology* 20(1): 26-38.
- Beckstead, A. A., Zhang, Y. Y., De Vries, M. S. & Kohler, B. 2016. Life in the Light: Nucleic Acid Photoproperties as a Legacy of Chemical Evolution. *Physical Chemistry Chemical Physics* 18(35): 24228-24238.
- Budyko, M. I. 1969. The Effect of Solar Radiation Variations on the Climate of the Earth. *Tellus* 21(5) :611-619.
- Cañadas, J. C., Diego, J. A., Mudarra, M., Parsa, S. E. & Sellarès, J. 2019. Effects of Uv Radiation on the Charge Trapping Capability of Pet. *Journal of Physics D: Applied Physics* 52(15): 155301



- Catling, D. C. & Zahnle, K. J. 2020. The Archean Atmosphere. *Science Advances* 6(9).
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L. & Suh, S. 2020. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8(9): 3494-3511.
- Chandru, K., Mamajanov, I., Cleaves, H. J. & Jia, T. Z. 2020. Polyesters as a Model System for Building Primitive Biologies from Non-Biological Prebiotic Chemistry. *Life-Basel* 10(1): 6
- Charnay, B., Wolf, E. T., Marty, B. & Forget, F. 2020. Is the Faint Young Sun Problem for Earth Solved? *Space Science Reviews* 216(5).
- Chen, Z., Liu, C.-Q., Sun, H. & Niu, Y. 2020. The Ultraviolet Colour Component Enhances the Attractiveness of Red Flowers of a Bee-Pollinated Plant. *Journal of Plant Ecology* 13(3): 354-360
- Deamer, D., Singaram, S., Rajamani, S., Kompanichenko, V. & Guggenheim, S. 2006. Self-Assembly Processes in the Prebiotic Environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 361(1474): 1809-1818.
- Del Socorro Sánchez Correa, M., El Rocío Reyero Saavedra, M., Antonio Estrella Parra, E., Nolasco Ontiveros, E., Del Carmen Benítez Flores, J., Gerardo Ortiz Montiel, J., Eduardo Campos Contreras, J., López Urrutia, E., Guillermo Ávila Acevedo, J., Edith Jiménez Nopala, G. & Montserrat Espinosa González, A. 2023. Ultraviolet Radiation and Its Effects on Plants. Dlm. (pnyt.). hlm.: *IntechOpen*.
- Donn, W. L., Donn, B. D., & Valentine, W. G. . 1965. On the Early History of the Earth. . *Geological Society of America Bulletin* 76(3): 287-306.).
- Feulner, G. 2012. The Faint Young Sun Problem. *Reviews of Geophysics* 50(2).
- Fraknoi, A., Morrison, D. & Wolff, S. 2023. *Astronomy 2e* (Paperback, B&W). Lightning Source.
- G.Kopp. 2018. Earth's Incoming Energy: The Total Solar Irradiance. *Earth Systems and Environmental Sciences* 5:32-66.
- Gözen, I., Köksal, E. S., Pöldsalu, I., Xue, L., Spustova, K., Pedrueza-Villalmanzo, E., Ryskulov, R., Meng, F. & Jesorka, A. 2022. Protocells: Milesto and Recent Advances. *Small*, 18(18):2106624.
- Harahap, E. S., Ginting, C. N., Lubis, Y. M. & Chiuman, L. 2022. The Activity of Strawberry Extract as Sunscreen on Guinea Pigs Exposed to Sunlight. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1083(1): 012007.
- Green, N. J., Xu, J. F. & Sutherland, J. D. 2021. Illuminating Life's Origins: Uv Photochemistry in Abiotic Synthesis of Biomolecules. *Journal of the American Chemical Society* 143(19): 7219-7236.
- Gueymard, C. A. 2004. The Sun's Total and Spectral Irradiance for Solar Energy Applications and Solar Radiation Models. *Solar Energy* 76(4): 423-453
- Guttenberg, N., Virgo, N., Chandru, K., Scharf, C. & Mamajanov, I. 2017. Bulk Measurements of Messy Chemistries Are Needed for a Theory of the Origins of Life. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 375(2109):20160347
- Heller, R., Duda, J. P., Winkler, M., Reitner, J. & Gizon, L. 2021. Habitability of the Early Earth: Liquid Water under a Faint Young Sun Facilitated by Strong Tidal Heating Due to a Closer Moon. *Palz* 95(4): 563-575.
- Janicki, M. J., Roberts, S. J., Šponer, J., Powner, M. W., Góra, R. W. & Szabla, R. 2018. Photostability of Oxazoline Rna-Precursors in Uv-Rich Prebiotic Environments. *Chemical Communications* 54(95): 13407-13410.
- Jia, T. Z., Chandru, K., Hongo, Y., Afrin, R., Usui, T., Myojo, K. & Cleaves, H. J. 2019. Membraneless Polyester Microdroplets as Primordial Compartments at the Origins of Life. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(32): 15830-15835.
- Kasting, J. F. & Howard, M. T. 2006. Atmospheric Composition and Climate on the Early Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 361(1474): 1733-1742.
- Kasting, J. F. & Ono, S. 2006. Palaeoclimates: The First Two Billion Years. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 361(1470): 917-929.
- Krissansen-Totton, J., Arney, G. N. & Catling, D. C. 2018. Constraining the Climate and Ocean Ph of the Early Earth with a Geological Carbon Cycle Model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115(16): 4105-4110.
- Kuhn, W. R. & Atreya, S. K. 1979. Ammonia Photolysis and the Greenhouse Effect i n t he Primordial Atmosphere of the Earth. *Icarus* 37(1): 207-213.
- Maltese, A. & Mezger, K. 2020. The Pb Isotope Evolution of Bulk Silicate Earth: Constraints from Its Accretion and Early Differentiation History. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 271:179-193.
- Mariani, A., Russell, D. A., Javelle, T. & Sutherland, J. D. 2018. A Light-Releasable Potentially Prebiotic Nucleotide Activating Agent. *Journal of the American Chemical Society* 140(28): 8657-8661.
- Mariscal, C., Barahona, A., Aubert-Kato, N., Aydinoglu, A. U., Bartlett, S., Cárdenas, M. L., Chandru,

- K., Cleland, C., Cocanougher, B. T., Comfort, N., Cornish-Bowden, A., Deacon, T., Froese, T., Giovannelli, D., Hernalund, J., Hut, P., Kimura, J., Maurel, M.-C., Merino, N., Moreno, A., Nakagawa, M., Peretó, J., Virgo, N., Witkowski, O. & James Cleaves, H. 2019. Hidden Concepts in the History and Philosophy of Origins-of-Life Studies: A Workshop Report. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 49(3): 111-145.
- Nuevo, M., Auger, G., Blanot, D. & D'hendecourt, L. 2008. A Detailed Study of the Amino Acids Produced from the Vacuum Uv Irradiation of Interstellar Ice Analogs. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 38(1): 37-56
- Patel, B. H., Percivalle, C., Ritson, D. J., Duffy, C. D. & Sutherland, J. D. 2015. Common Origins of Rna, Protein and Lipid Precursors in a Cyanosulfidic Protometabolism. *Nature Chemistry* 7(4): 301-307.
- Pavlov, A. A., Brown, L. L. & Kasting, J. F. 2001. Uv Shielding of NH<sub>3</sub> and O<sub>2</sub> by Organic Hazes in the Archean Atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets* 106(E10): 23267-23287.
- Pollack, J. B. 1971. A Nongrey Calculation of the Runaway Greenhouse: Implications for Venus' Past and Present. *Icarus* 14(3):295-306.
- Powner, M. W., Anastasi, C., Crowe, M. A., Parkes, A. L., Raftery, J., & Sutherland, J. D. (2007). On the prebiotic synthesis of ribonucleotides: photoanomerisation of cytosine nucleosides and nucleotides revisited. *ChemBioChem*, 8(10), 1170-1179.
- Rajamani, S. & Biondi, E. 2022. Mist and Replication. *Nature Physics* 18(5): 480-481.
- Richard Gordon, G. M. 2021. Planet Formation and Panspermia: New Prospects for the Movement of Life through Space. Dlm. Branislav Vukotić, R. G., Joseph Seckbach (pnyt.). There Were Plenty of Day/Night Cycles That Could Have Accelerated an Origin of Life on Earth, without Requiring Panspermia, hlm. 195-206. *Scrivener Publishing LLC*.
- Rimmer, P. B., Thompson, S. J., Xu, J. F., Russell, D. A., Green, N. J., Ritson, D. J., Sutherland, J. D. & Quelo, D. P. 2021. Timescales for Prebiotic Photochemistry under Realistic Surface Ultraviolet Conditions. *Astrobiology* 21(9): 1099-1120
- Sagan, C. & Chyba, C. 1997. The Early Faint Sun Paradox: Organic Shielding of Ultraviolet-Labile Greenhouse Gases. *Science* 276(5316): 1217-1221.
- Sagan, C. & Mullen, G. 1972. Earth and Mars - Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures. *Science* 177(4043): 52-56.
- Sagan, C. & Chyba, C. 1997. The Early Faint Sun Paradox: Organic Shielding of Ultraviolet-Labile Greenhouse Gases. *Science* 276(5316): 1217-1221.
- Saha, A., Yi, R., Fahrenbach, A. C., Wang, A. & Jia, T. Z. 2022. A Physicochemical Consideration of Prebiotic Microenvironments for Self-Assembly and Prebiotic Chemistry. *Life* 12(10): 1595.
- Schmitt-Kopplin, P., Gabelica, Z., Gougeon, R. D., Fekete, A., Kanawati, B., Harir, M., Gebefuegi, I., Eckel, G. & Hertkorn, N. 2010. High Molecular Diversity of Extraterrestrial Organic Matter in Murchison Meteorite Revealed 40 Years after Its Fall. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(7): 2763-2768.
- Sefl, O., Vesely, P., Minar, J. & Dusek, K. 2020. Novel Electrical Insulation Materials – Photodegradation Endurance of 3d Printed Polylactic Acid. *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Dagnostika)*, hlm. 1-5.
- Sellers, W. D. 1969. A Global Climatic Model Based on the Energy Balance of the Earth-Atmosphere System. *Journal of Applied Meteorology* 8(3):392-400.
- Shaviv, N. J. 2003. Toward a Solution to the Early Faint Sun Paradox: A Lower Cosmic Ray Flux from a Stronger Solar Wind. *Journal of Geophysical Research-Space Physics* 108(A12).
- Siess, L., Dufour, E. & Forestini, M. 2000. An Internet Server for Pre-Main Sequence Tracks of Low- and Intermediate-Mass Stars. *Astronomy & Astrophysics* 358(2): 593-599.
- Sithamparam, M., Sathiyasilan, N., Chen, C., Jia, T. Z. & Chandru, K. 2022. A Material-Based Panspermia Hypothesis: The Potential of Polymer Gels and Membraneless Droplets. *Biopolymers* 113(5): e23486.
- Sivula, O. 2022. The Cosmic Significance of Directed Panspermia: Should Humanity Spread Life to Other Solar Systems? *Utilitas* 34(2): 178-194.
- Taib, N., Rahman, M. R., Huda, D., Kuok, K. K., Hamdan, S., Bin Bakri, M. K., Bin Julaihi, M. R. M. & Khan, A. 2023. A Review on Poly Lactic Acid (PLA) as a Biodegradable Polymer. *Polymer Bulletin* 80(2): 1179-1213.
- Tanveer, M. A., Rashid, H., Nazir, L. A., Archoo, S., Shahid, N. H., Ragni, G., Umar, S. A. & Tasduq, S. A. 2023. Trigonelline, a Plant Derived Alkaloid Prevents Ultraviolet-B-Induced Oxidative DNA Damage in Primary Human Dermal Fibroblasts and Balb/C Mice Via Modulation of Phosphoinositide 3-Kinase-Akt-Nrf2 Signalling Axis. *Experimental Gerontology* 171:112028.
- Taylor, D. 2012. The Sun's Evolution. <https://faculty.wcas.northwestern.edu/infocom/The%20Website/evolution.html> [7 Nov 2022].
- Urai, A., Takano, Y., Imachi, H., Ishii, S. I., Matsui, Y., Ogawara, M., Tasumi, E., Miyairi, Y., Ogawa, N. O., Yoshimura, T., Inagaki, F., Yokoyama, Y., Kawano, K., Murai, D., Park, H.-D. & Ohkouchi, N. 2021. Origin of Deep Methane Associated with a Unique Community of Microorganisms in an Organic- and Iodine-Rich Aquifer. *Acs Earth and Space Chemistry* 5(1): 1-11.
- Walker, J. C. G., Hays, P. B., & Kasting, J. F. 1981. A

- Negative Feedback Mechanism for the Long-Term Stabilization of Earth's Surface Temperature. *Journal of Geophysical Research* 86(C10): 9776-9782.
- Wei, L., Alelmi, I. & Nieh, S. 2023. Calculations of Stratospheric Ozone and Effects of Diffusivity. *Atmospheric and Climate Sciences* 13(3): 385-400.
- Wolf, E. T. & Toon, O. B. 2010. Fractal Organic Hazes Provided an Ultraviolet Shield for Early Earth. *Science* 328(5983): 1266-1268.
- Zahnle, K. J., Gacesa, M. & Catling, D. C. 2019. Strange Messenger: A New History of Hydrogen on Earth, as Told by Xenon. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 244:56- 85.