



Evolutionary Perspective of Sulfur Dynamics in Tomohon and Implications on Microbial Corrosion

Fritzy Lisa Taroreh¹, Jubhar C. Mangimbulude², Ferry F. Karwur^{1,*3}

¹Biology Master Program, Satya Wacana Christian University

²Aquatic Resources Management Study Program, Faculty of Natural Sciences and Engineering Technology,
Halmahera University, Tobelo, North Halmahera

³Faculty of Health Sciences, Satya Wacana Christian University
Jl. Diponegoro52-60 Salatiga50714, Central Java

*E-mail: fkarwur@yahoo.com

Abstract

Sulfur (S) is a non-metal, multivalent, tasteless and odorless element. The vast amount of sulfur valence (from S^{2-} to S^{6+}) allows such element to participate in various geochemical and biochemical processes. In nature, sulfur is everywhere, abundant and distribute evenly on earth and the solar system. On 'ancient' earth in anoxic atmospheric condition, sulfur existed in the form of H_2S . In oxic period, following the discovery of photosynthesis, sulfur was commonly found in the form of sulfur oxides (SO_x). This paper discusses the evolutionary perspective of sulfur by presenting and discussing three following aspects: (i) The formation of sulfur element through "nucleosynthesis" that generating 4 sulfur isotopes with various abundances ($^{32}S=95.02\%$; $^{33}S=0.75\%$; $^{34}S=4.21\%$; $^{36}S=0.02\%$), (ii) Geological record of $\Delta^{33}S$ and sulphate dynamics in the atmosphere since 2,500,000,000-290,000,000 years ago as volcanic gas; and, (iii) The transformation of various types of sulfur compounds in oxic condition nowadays as SO_2 , SO_3 , H_2SO_4 , sulfite salt, sulfate salt, and organic sulfur aerosols. Special attention is given to the sulfur cycle and changing dynamics in nature related to volcanism in geological context of North Sulawesi, especially Tomohon areas, and practical implication of microbiological corrosion is considered as the implication of the sulphuric evolution that affect the life of modern society.

Keywords: sulfur, sulfur cycle, volcanism, microbiological corrosion

Pendahuluan

Sulfur (Simbol S) atau belerang adalah unsur non-metal multivalen, tidak berasa dan tidak berbau. Banyaknya valensi sulfur (dari S^{2-} sampai S^{6+}) memungkinkan sulfur berpartisipasi dalam berbagai proses geokimia dan biokimia. Dalam Tabel Periodik, unsur S terletak di Periode 3 Golongan VIA (atau Golongan 16) bersama-sama dengan unsur oksigen (O), selenium (Se), telurium (Te) dan polonium (Po) dan disebut sebagai golongan kalkogen, dari bahasa Yunani (Chalcos = biji; gen = pembentuk). Jadi Kalkogen termasuk sulfur adalah unsur pembentuk biji (Mandeville, 2010).

Di alam, sulfur ada dimana-mana dan jumlahnya sangat berlimpah, bahkan tersebar luas di bumi dan sistem tata surya. Menurut Morgan & Anders (1980) sulfur merupakan unsur kedelapan yang paling melimpah dan hadir dalam konsentrasi terbesar pada lapisan silikat bumi sekitar 250 ppm (McDonough & Sun, 1995). Mereka dapat dijumpai sebagai mineral sulfida dalam mantel bumi, sebagai mineral sulfat dalam batuan kerak, sebagai belerang 'asli' dalam gunung berapi aktif atau tidak aktif, sebagai sulfat terlarut atau dimetil sulfida dalam air laut, dan sebagai 'trace gas' di atmosfer (Mandeville, 2007). Dalam tubuh manusia sekalipun terdapat sulfur dalam bentuk asam amino misalnya metionin, homosistein, sistein dan taurin.

Keberadaan sulfur di bumi 'purba' sudah ada yaitu dalam bentuk senyawa H_2S di atmosfer. Meskipun bukti (catatan) eksplisit dari ko-evolusi awal atmosfer dan biosfer dengan geosfer sulit diselidiki, namun diyakini bahwa atmosfer awal di bumi sangat kekurangan oksigen tetapi sulfur dalam bentuk senyawa H_2S justru sudah ada. Oleh penemuan organisme fotosintesis > 2,8 milyar tahun lalu, oksigen dihasilkan dan konsentrasinya di biosfer (dan di lautan) meningkat dari ketiadaan menjadi yang sekarang ini 21% (bahkan pernah mencapai 30-35% pada jaman PermoCarboniferous, sekitar 350-300 juta tahun lalu, (Karwur, 2012). Akibatnya, atmosfer kita yang kaya H_2S lambat-laun mengkonversi H_2S menjadi senyawa-senyawa teroksida mengikuti proses oksigenasi atmosfer dan lautan. Jadi, saat kondisi anoksik, sulfur sudah hadir sebagai senyawa hidrogen sulfida (H_2S), sedangkan pada kondisi oksik mereka juga ada sebagai senyawa sulfur dioksida (SO_2). Naiknya kadar oksigen di bumi membuat



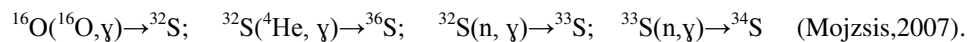


senyawa sulfur sebagai H_2S menjadi teroksidasi dan membentuk sulfur oksida, SO_2 . Dustin Trail *et al.*, (2011) ikut menguatkan dengan temuannya dan menyatakan bahwa atmosfer pun didominasi senyawa-senyawa kaya oksigen (*kondisi oksik*) yang juga ditemukan dalam atmosfer kita saat ini (selain air), terutama sebagai CO_2 dan SO_2 (sulfur dioksida).

Sejumlah penjelasan diatas menjadi pengantar tulisan ini, untuk mengkaji keistimewaan unsur sulfur yang ternyata sudah ada sejak bumi 'purba' (kondisi *anoksik*) bahkan sampai di bumi 'modern' sekarang ini saat kondisi oksigen melimpah (kondisi *oksik*). Tulisan ini mengkaji dan membahas perspektif evolusi dari penciptaan sulfur, dinamikanya di atmosfer-siklus sulfur di alam kaitannya dengan proses vulkanisme sampai pada dinamika perubahannya sulfur dalam konteks geologi di semenanjung utara Sulawesi, khususnya di daerah kota Tomohon. Pada bagian akhir dibahas mengenai implikasi sifat reaktif unsur sulfur yang mudah berinteraksi dengan oksigen dan logam melalui proses korosi mikrobiologi dan cara menanggulangi korosi mikrobiologi-sebagai implikasi dari kehadiran sulfur dalam kehidupan masyarakat modern.

Penciptaan Unsur Sulfur

Sulfur adalah salah satu elemen cahaya dalam inti bumi dan menjadi elemen penting dalam pembentukan inti bumi dan merupakan unsur keenam yang paling melimpah di seluruh bumi (~1,9%) berat dan hanya dilampaui oleh besi, oksigen, silikon, magnesium dan nikel. Unsur ini ada di beberapa bahan tertua dalam sistem tata surya (Mandeville, 2010). Terciptanya unsur ini adalah dari peristiwa "nucleosynthesis" yaitu proses penciptaan inti-inti atom baru, pada waktu reaksi ledakan-pembakaran oksigen yang dahsyat difase supernova evolusi bintang. Reaksi ini sering disebut reaksi pembakaran oksigen yang kemudian menghasilkan 4 isotop sulfur :



Sebagai hasil dari proses reaksi nuklir tersebut, ada 4 isotop sulfur yang stabil, dengan jumlah relative masing-masing seperti standar sulfur Canon Diablo Troilite (Hultson & Thode, 1965) yaitu: $^{32}S = 95,02\%$; $^{33}S = 0,75\%$; $^{34}S = 4,21\%$; $^{36}S = 0,02\%$. Kelimpahan tertinggi adalah isotop ^{32}S (95,02%). Kenyataan ini dapat dipahami karena ^{32}S langsung disintesis dari reaksi pembakaran oksigen.

Catatan Geologi $\Delta^{33}S$ - Evolusi Sulfur di Atmosfer

Sebagian besar penelitian difokuskan hanya pada 2 isotop sulfur yang paling melimpah yaitu ^{32}S dan ^{34}S . Namun komposisi isotop ^{33}S di beberapa batuan tertua di bumi baru-baru ini telah diukur. Pengamatan dalam catatan batu kuno memberikan wawasan baru tentang kondisi lingkungan di awal bumi. Catatan ini membagi sejarah bumi menjadi tiga tahap yang mencerminkan perubahan mendasar di atmosfer bumi dan siklus sulfur melalui waktu ke waktu, seperti yang dikemukakan oleh Farquhar & Wing (2003). Ada 3 tahapan evolusi sulfur yaitu :

- **Tahap I (sebelum ~ 2,45 Ga)**

Tahap I dimulai dari (usia) batuan bumi tertua sampai kira-kira 2,45 Ga. Pada tahap I ini reaksi fotolisis SO_2 dan SO didukung oleh radiasi UV dari atmosfer 'primitif'. Gas sulfur di atmosfer awal hasil fotokimia sinar UV menghasilkan signature massa independen sulfur yang ditransfer ke permukaan bumi melalui dua saluran: (1) sulfur ditransfer dengan $-\Delta^{33}S$ terutama sebagai H_2SO_4 (oksidasi); (2) sulfur di transfer dengan $+\Delta^{33}S$ sebagai elemen sulfur S_8 (reduksi). Jumlah $\Delta^{33}S$ ditahap ini lebih besar dari $\pm 1\%$.

- **Tahap II (~ 2,45 sampai ~ 2,0 Ga)**

Tahap II dimulai 2,45 Ga sampai kira-kira 2,0 Ga. Pada masa ini terjadi perubahan dalam evolusi (geokimia) permukaan bumi seperti peristiwa kejadian oksidasi skala besar (Great Oxidation Event, GOE). Pada tahap ini kandungan oksigen telah meningkat secara dramatis dari tahap I ($<10^{-5}$ PAL) ke tingkat yang lebih tinggi dari 10^{-2} PAL. Perubahan ini membuat kadar $\Delta^{33}S$ berubah. Farquhar dan Wing (2003) memperkirakan $\Delta^{33}S$ sedimen Arkean mereduksi sulfur menjadi $0,5 \pm 0,2 \%$ dan $\Delta^{33}S$ sulfur muda menjadi $\approx 0 \%$. Jumlah $\Delta^{33}S$ pada tahap II ini yaitu -0,1 sampai +0,5%.

- **Tahap III (sejak ~2,0 Ga)**

Catatan $\Delta^{33}S$ pada tahap III berlangsung kira-kira sejak 2,0 Ga. Kadar oksigen ditahap ini cukup tinggi yaitu lebih dari 10^{-2} PAL hal ini membuat kadar $\Delta^{33}S$ berubah karena oksigen 'ikut masuk' dalam siklus sulfur melalui oksidasi sulfat dan akan dilepaskan saat sulfat direduksi. Pada tahap ini jumlah $\Delta^{33}S$ adalah -0,1 sampai +0,2%.

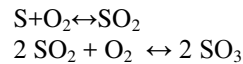
Dinamika Sulfur di Atmosfer – Siklus Sulfur di Alam

Dinamika sulfur di atmosfer saat ini dipengaruhi oleh aktivitas alam seperti letusan gunung berapi dan kegiatan manusia (modern). Sangat berbeda dengan dinamika sulfur di atmosfer di bumi 'purba' dimana

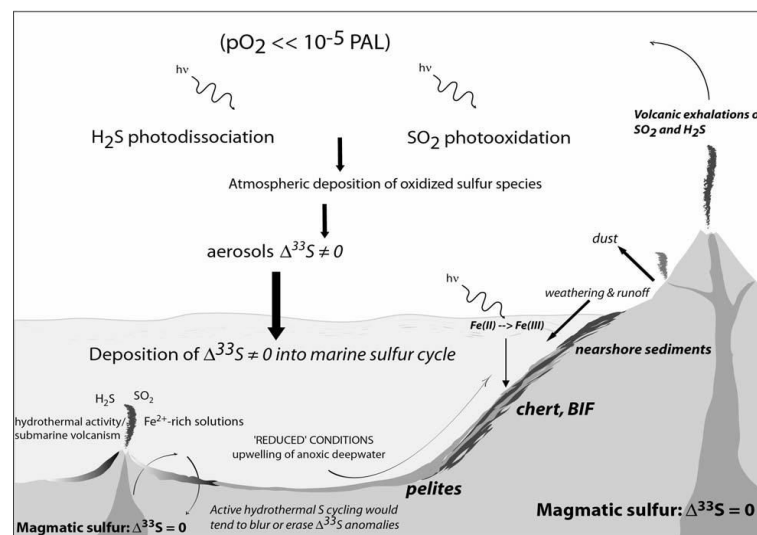


keberadaannya belum dipengaruhi oleh kegiatan manusia tetapi oleh aktivitas alam/ peristiwa vulkanik. Toon et al (1987) menyatakan bahwa sulfur 'disuntikkan' ke dalam atmosfer sebagai gas vulkanik, terutama sebagai SO_2 dan H_2S dan masuk dalam atmosfer biogenik terutama sebagai CH_3SCH_3 (dimetil sulfide, biasa ditulis "DMS"), OCS , dan C_2S_2 . Gas-gas ini tampak di akhir masa 'Archean' dan awal Proterozoikum (2,5 milyar - 290 juta tahun lalu).

Di suasana oksik sekarang, senyawa sulfur di atmosfer terdiri dari H_2S , SO_2 , SO_3 , H_2SO_4 , garam-garam sulfid, garam-garam sulfat, dan aerosol sulfur organik. Dua pertiga dari jumlah sulfur di atmosfer berasal dari sumber-sumber alam seperti peristiwa vulkanik dan terdapat dalam bentuk H_2S dan oksida sulfur (SO_x). Sepertiga bagian lagi adalah dari hasil kegiatan manusia misalnya pembakaran bahan-bahan yang mengandung sulfur yang kemudian akan menghasilkan bentuk sulfur oksida (SO_3 atau SO_2) dan kebanyakan dalam bentuk SO_2 . Mekanisme pembentukan gas sulfur oksida di atmosfer (hasil pembakaran/ aktivitas manusia) berlangsung dalam dua tahap reaksi sebagai berikut (Wiharja,2002):



Di udara, jumlah SO_2 selalu terbentuk dalam jumlah yang lebih besar dari SO_3 , karena pembentukan SO_3 sangat dipengaruhi oleh kondisi reaksi seperti suhu dan jumlah O_2 . Jumlah SO_3 yang terbentuk biasanya tidak lebih dari 10% dari jumlah gas sulfur oksida (SO_x). Selain itu gas H_2S yang berasal dari aktivitas gunung berapi melalui proses oksidasi di udara akan berubah menjadi SO_2 . Setelah berada di atmosfer SO_2 akan diubah menjadi SO_3 , kemudian menjadi H_2SO_4 oleh proses-proses fotolitik dan katalitik. Ditambahkan oleh Kasting et al. (1989), bahwa ketika teroksidasi sulfur sebagai SO_2 atau SO_3 bereaksi cepat dengan H_2O dan membentuk H_2SO_4 (asam sulfat). H_2SO_4 ini turun ke bumi sebagai hujan asam, pH hujan rendah ($\text{pH} < 7$). Mikroorganisme kemudian akan mereduksi asam sulfat menjadi H_2S (hidrogen sulfida). Proses transformasi atau perubahan senyawa sulfur dari satu bentuk ke bentuk yang lain inilah yang disebut siklus sulfur di alam.



Gambar 1. Model skema siklus sulfur diawal bumi (Mojzsis et al., 2003). Angka dalam gambar merupakan kemungkinan model kontribusi massa belerang-independen untuk subduksi di bumi purba lihat Farquhar et al (2002).

Dalam siklus sulfur, untuk mengubah sulfur menjadi senyawa belerang lainnya setidaknya ada dua jenis proses yang terjadi, yaitu melalui reaksi antara sulfur, oksigen dan air serta oleh aktivitas mikroorganisme. Farquhar et al (2002) mengemukakan model konseptualnya untuk siklus sulfur (diawal archaean dan masih terjadi sampai hari ini), bahwa sulfur dioksida (SO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S) dikeluarkan dari gunung berapi dan diubah oleh radiasi ultraviolet dan disimpan di permukaan reservoir sebagai aerosol dan akhirnya didaur ulang ke dalam mantel bumi. Dalam skema tersebut, sulfat di kerak samudera terakumulasi dan dapat direduksi menjadi sulfida (secara biologis atau termo-kimia), subduksi, dan didaur ulang menjadi magma busur (Gambar 1).

Dari penjelasan Farquhar et al (2002) terlihat kaitan antara senyawa sulfur: SO_2 , H_2S , siklus sulfur dan gunung berapi. Bagaimana keterkaitan mereka dalam suatu proses biogeokimia? Menarik untuk dicatat bahwa sulfur dioksida (SO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S) yang keduanya merupakan senyawa belerang dikeluarkan dari semburan gunung berapi dan dari aktivitas hidrotermal misalnya sumber air panas (Gambar 1). Hal ini berarti bahwa gunung berapi dan sumber air panas memiliki kaitan erat dengan siklus sulfur di bumi



Gunung Lokon, Gunung Mahawu, Geotermal Lahendong, dan Air Panas Sarongsong sebagai Satu Kesatuan Geologi.

Letusan gunung berapi mengeluarkan material vulkanik, lahar, abu letusan, awan panas, dan gas vulkanik. Gas vulkanik ini diantaranya adalah sulfur dioksida (SO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S). Indonesia dikenal sebagai negara yang memiliki gunung api aktif terbanyak di dunia, yaitu lebih dari 30% (129 buah) dari gunung aktif dunia, ada di Indonesia dan tersebar di jalur Cincin Api (*Ring of fire*) Pasifik. Dan sekitar 8% gunung api aktif berada di Propinsi Sulawesi Utara (Anthe *et al.*, 2015). Banyaknya gunung api memberikan potensi besar berupa energi panas bumi dan keanekaragaman geologi (*geodiversity*). Gunung api yang aktif di Sulawesi Utara, khususnya di Tomohon adalah Gunung Lokon dan Mahawu. Kedua gunung itu merupakan bagian dari sistem Busur Kepulauan Sangihe terkait dengan zona tumbukan Laut Molluca. Zona Tumbukan Laut Molluca terletak pada persimpangan lempeng Eurasia, Australia, Pasific dan Filipina.

Geothermal Lahendong terletak 30 km sebelah selatan dari Manado, juga merupakan bagian dari sistem Busur Kepulauan Sangihe dan menjadi salah satu sumber daya utama panas bumi di Indonesia dan menghasilkan senyawa mengandung sulfur (SO_4^{2-}). Selain itu ada juga Air Panas Sarongsong yang mengandung sulfur, SO_4^{2-} (Taroreh dkk., 2015). Di masa lampau, dan mungkin sekali sampai saat ini, Gunung Mahawu juga merupakan gunung yang ikut mempengaruhi siklus sulfur di Kota Tomohon, melalui gas sulfurik yang dibuangnya. Gunung Mahawu meletus pertama kalinya dalam catatan sejarah pada tahun 1789 dan terakhir pada tahun 1999. Data senyawa sulfur yang ada di Gunung Lokon, Gunung Mahawu, daerah geotermal Lahendong dan Air Panas Sarongsong dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Data senyawa sulfur di Gunung Lokon, Mahawu, geotermal Lahendong dan Air Panas Sarongsong

Jenis Senyawa Sulfur	^(a) Gunung Lokon (mmol/mol)	^(b) Gunung Mahawu (mmol/mol)	^(c) Lahendong (mg/L)			^(d) Air Panas Sarongsong (mg/L)		
		IND-4	LHD-05	LHD-23	S1	S2	S3	
SO_2	0,25	0,118	t.a.d	t.a.d	td	td	td	
H_2S	0,43	0,144	t.a.d	t.a.d	td	td	td	
SO_4^{2-}	t.a.d	t.a.d	6,9-27,4	537-1609	3,5	10,94	34,95	

Sumber :

Clor *et al.* (2005) seperti yang dikutip Pfeffer (2007),
 Clor (2004), Keserovic (2014), Taroreh dkk (2015)

Ket : td = tidak diukur
 t.a.d = tidak ada data

Dari data pada Tabel 1, terlihat bahwa Gunung Lokon dan Gunung Mahawu menghasilkan senyawa sulfur dalam bentuk SO_2 dan H_2S sedangkan daerah Geotermal Lahendong dan Air Panas Sarongsong – hasil pengukuran senyawa sulfurnya (Taroreh, dkk) dalam bentuk SO_4^{2-} . (Perbedaan ini bisa terjadi karena metode pengukurannya yang berbeda yang satu diukur dalam bentuk gasnya yang lain dalam bentuk cairannya).

Keberadaan senyawa sulfur di Gunung Lokon, Gunung Mahawu, daerah Geotermal Lahendong, Air Panas Sarongsong sama-sama mempengaruhi kesetimbangan siklus sulfur di Kota Tomohon. Hal ini karena ke 4 lokasi tersebut terletak di kota Tomohon yang berada pada satu kesatuan geologi di daerah Sulawesi Utara). Kesatuan geologi yang dimaksud adalah bahwa daerah Kota Tomohon, terletak pada jalur gunung berapi aktif (jalur mediteran). Prospek panas bumi di daerah ini ditandai oleh dijumpainya manifestasi panas bumi di Geotermal Lahendong dan air panas Sarongsong. Kondisi geologi daerah ini didominasi oleh batuan vulkanik berumur tersier (*post miosen*) sampai resen. Batuan vulkanik gunung api juga ada didaerah ini dan membentuk gunung api tipe strato antara lain gunung lokon, mahawu.

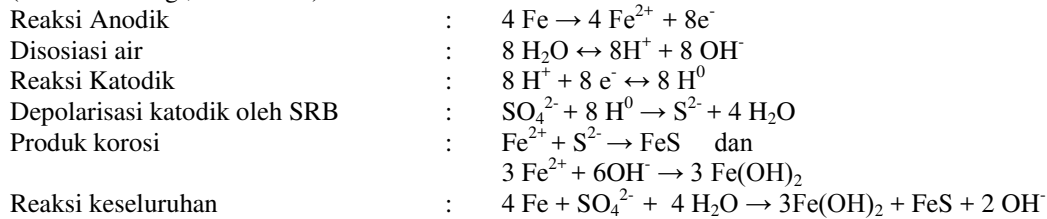
Korosi Mikrobiologi: Implikasi Sifat Reaktif Unsur Sulfur dengan Oksigen dan Logam

Keberadaan sulfur di lingkungan memberikan peluang hidup bagi mikroba pengguna senyawa tersebut. Mikroba tersebut, disebut sebagai *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB). SRB adalah bakteri yang mereduksi sulfat dan memproduksi H_2S yang merupakan senyawa penyebab korosi mikrobiologis atau MIC (*Microbiologically Influenced Corrosion*). Terjadinya reduksi, memerlukan tiga komponen yaitu SRB, sulfat, dan elektron bebas sebagai sumber energi eksternal yang harus hadir serta suhu air harus kurang dari sekitar 65°C (Kumar dan Anand, 1998). Korosi jenis ini cukup berbahaya karena dapat terjadi pada kondisi range 4 sampai 9 termasuk pada pH netral dengan suhu lingkungan berkisar $10-50^\circ\text{C}$. Sejumlah penelitian melaporkan korosi mikrobiologis dapat terjadi di semua tempat dan dalam berbagai kondisi (pH asam, basa atau netral) (Supardi, 1997). Awal kemunculan dari MIC sering kali tidak terduga, karena mereka dapat tumbuh pada kisaran pH 2 sampai pH 9, tetapi optimalnya





pada pH 7 dan hidup secara anaerob. Menurut Dexter (1996) SRB yang berperan dalam proses korosi pada besi dan baja berasal dari genus *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* dan *Desulfomonas* yang semuanya hidup secara anaerob. Dalam suasana anaerob, asam sulfat akan direduksi oleh bakteri pereduksi sulfat menghasilkan gas H₂S dan H₂O. H₂S yang dihasilkan akan bereaksi dengan besi membentuk FeS, Fe(OH)₂ (Suhartanti,2006) dan menimbulkan **korosi mikrobiologi**. Mekanisme kerusakan logam oleh SRB berlangsung dengan tahapan reaksi sebagai berikut (Kuhr dan Vlugt, tahun1934) :



Korosi di lingkungan masyarakat dan industri dianggap merugikan secara ekonomi karena berhubungan dengan penurunan kemampuan peralatan yang terbuat dari logam sehingga menyebabkan timbulnya biaya-biaya yang harus dikeluarkan, baik untuk perbaikan maupun untuk menerapkan suatu sistem perlindungan (Deviyani & Nurdin,2006). Sebagai contoh, pendapatan per kapita Negara,GNP (Gross National Product) di Amerika Serikat pada tahun 1992 bisa berkurang sebesar 4,2% (setara 290 juta dolar) akibat korosi. Indonesia sebagai negara di kawasan tropis juga paling banyak menderita kerugian akibat korosi, tetapi belum ada data yang jelas tentang jumlah kerugian setiap tahunnya.

Inhibisi pada Korosi Mikrobiologi

Peristiwa korosi pada logam merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari, namun dapat dihambat maupun dikendalikan untuk mengurangi kerugian dan mencegah dampak negatif yang diakibatkannya. Dampak dari korosi mikrobiologi dapat dikurangi dengan penambahan inhibitor korosi. Inhibitor korosi adalah suatu zat yang ditambahkan dalam konsentrasi kecil ke dalam lingkungan, yang akan menyebabkan penurunan laju korosi di lingkungan tersebut. Salah satu inhibitor korosi mikrobiologis yang dapat digunakan yaitu natrium hipoklorit. Senyawa ini diketahui mampu menghambat metabolisme bakteri. Inhibitor akan membentuk lapisan protektif misalnya inhibitor katodis: akan membentuk lapisan hidroksida yang sukar larut, sedangkan inhibitor anodis akan membentuk anion yang dengan ion logam dapat membentuk persenyawaan yang sukar larut. Inhibitor yang dapat ditambahkan dalam menanggulangi korosi mikrobiologis (Arisandi, 2014) adalah :

- Akali (inhibitor katodis), biasanya dibubuhkan NaOH yang dapat membentuk hidroksida yang sukar larut dan dapat menetralkan lingkungan asam.
- Persenyawaan kromat atau bikromat (inhibitor anodis) misalnya Na₂CrO₄.
- Persenyawaan fosfat, Na₃PO₄ yang dapat terionisasi menjadi PO₄²⁻ dimana dengan ion Fe³⁺ yang ada dalam air akan membentuk garam Fe₂(PO₄)₃ yang merupakan lapisan tipis tetapi merupakan pelindung terhadap korosi.
- Senyawa silikat, biasanya natrium silikat (Na₂SiO₃) yang jika bereaksi dengan besi dapat membentuk besi silikat yang merupakan lapisan yang sukar larut dan pelindung dari korosi.

Selain penambahan inhibitor, pencegahan MIC (*Microbiologically Influenced Corrosion*) dapat dilakukan dengan cara melakukan pembersihan permukaan secara mekanis berkala dan perawatan dengan *biocides* untuk mengontrol populasi bakteri. *Biocides* adalah formasi dari satu atau lebih substansi aktif yang dapat membunuh atau mengendalikan mikroorganisme. Salah satu contoh *biocides* yaitu THPS(tetrakis-hydroxymethyl fosfoniumsulfat) yaitu senyawabarudengan spectrum yang lebar dan efektifpada bakteri, jamur, dan ganggang. Biocides ini sedangbanyak digunakan dalamindustri minyakkarena kemampuannyauntuk melarutkanbesi sulfida (Videla & Herrera,2005).Keuntungan utamanya adalahtoksisitaslingkunganrendah.

Kesimpulan

- Sulfur atau belerang tercipta melalui peristiwa "nucleosyntesis" difase supernova evolusi bintang yang kemudian menghasilkan 4 isotop sulfur yang stabil yaitu : ³²S, ³³S, ³⁴S dan ³⁶S.
- Evolusi sulfur di atmosfer – catatan geologi $\Delta^{33}\text{S}$, membagi sejarah bumi menjadi 3 tahap yaitu tahap I: sebelum~2,45 Ga, tahap II:~2,45 sampai 2,0 Ga dan tahap III: sejak~2,0 Ga. Setiap tahap mencerminkan perubahan mendasar di atmosfer bumi dan siklus sulfur dari waktu ke waktu.
- Dinamika sulfur di atmosfer erat kaitannya dengan siklus sulfur dialam. Siklus sulfur di alam dipengaruhi oleh kegiatan manusia dan aktivitas vulkanik. Gunung Lokon, Mahawu, geothermal Lahendong dan air panas Sarongsong sama-sama berada di kota Tomohon yang terletak pada jalur gunung berapi aktif (jalur mediteran) sehingga memiliki kesatuan secara geologi. Konsentrasi SO₂ dan H₂S untuk Gunung Lokon adalah 0,25 mmol/mol, dan 0,43 mmol/mol sedangkan dari Gunung Mahawu konsentrasi SO₂-nya 0,118





mmol/mol dan H₂S 0,144 mmol/mol. Konsentrasi SO₄²⁻ yang terukur di daerah Geotermal Lahendong di LHD-05 dan LHD-23 berturut-turut adalah 6,9-27,4 mg/L dan 537-1609 mg/L sedangkan di air panas Sarongsong SO₄²⁻ yang terukur di S1 3,5 mg/L; S2 10,94 mg/L dan S3 34 mg/L.

- Bakteri Pereduksi Sulfat adalah bakteri yang mereduksi sulfat dan memproduksi H₂S yang merupakan senyawa penyebab korosi mikrobiologis. Korosi Mikrobiologis merupakan implikasi sifat reaktif unsur sulfur dengan oksigen dan logam- yang perlu dipelajari untuk dapat dikurangi karena sifatnya yang merugikan masyarakat modern.
- Korosi Mikrobiologi dapat dikurangi dengan penambahan inhibitor korosi. Selain penambahan inhibitor, pencegahan MIC (*Microbiologically Influenced Corrosion*) dapat dilakukan dengan cara melakukan pembersihan permukaan secara mekanis berkala dan perawatan dengan *biocides* untuk mengontrol populasi bakteri.

Ucapan Terima Kasih

Frity mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Kota Tomohon melalui Dinas Pendidikan Daerah Kota Tomohon yang telah memberikan beasiswa bekerjasama dengan Program Magister Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana Salatiga.

DaftarPustaka :

- Andres RJ and Kasgnoc AD. A time-averaged Inventory of Subaerial Volcanic Sulfur Emissions. *J. Geophys. Res.* 1998; 103: 25251-25261.
- Anthe S, Pasau G, Tanauma A. Variasi Zona Lemah Struktur Internal Gunung Lokon berdasarkan Studi Seismo-Vulkanik. *Jurnal Ilmiah Sains* 2015; 15(1): 27-32.
- Arisandi Y. Korosi Mikrobial. Pusat Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan. PPPPTK VEDC. Malang, 2014.
- Clark BC. Sulfur: Fountainhead of life in the Universe. CP-2156 Life in the Universe. Conference Proceedings, June 19-20, 1979, NASA Ames Research Center, Moffet Field, CA.
- Clor L, Fischer T, Hilton D, Sharp Z, and Hartono U. Volatile and N isotope chemistry of the Molucca Sea Collision Zone : Tracing Source Components along the Sangihe Arc, Indonesia. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2005; 6 DOI:10.1029/2004GC000825.
- Clor L.E. Geochemistry of Volatiles and Melt Inclusions from the Sangihe Arc, Indonesia. Master of Science Earth and Planetary Sciences. The University of New Mexico. New Mexico, Thesis, 2004.
- Deviyani L., Nurdin I. Inhibisi Korosi Baja dalam Air Laut mengandung Sulfida menggunakan Glutaraldehyda. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia* 2006; 5(1): 341-349.
- Dexter CS. General Biological Corrosion. ASM Handbook. Formerly 9th ed. Metals Handbook, Vol. 13. 1996.
- Dustin T, Bruce W, Nicholas DT. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere. *Nature* 2011; 480 (7375): 79 DOI: [10.1038/nature10655](https://doi.org/10.1038/nature10655).
- Farquhar J., Wing B. Multiple Sulfur Isotopes and Evolution of the Atmosphere. Elsevier Science BV. *Earth and Planetary Science Letters* 2003; 6707:1-13.
- Farquhar J, Wing BA, McKeegan KD, Harris JW, Cartigny P, Thiemens MH. Mass-independent Sulfur of Inclusions in Diamond and Sulfur Recycling on early Earth. *Science* 2002; 298:2369-2372.
- Hutston JR, Thode HG. Variations in the S33, S34, and S36 contents of meteorites and their relation to chemical and nuclear effects. *Journal of Geophysical Research* 1965; 70:3475-3484
- Jalaludin. Pengaruh Hardnes pada Baja yang Terendam dalam Air Laut yang mengandung Bakteri Pereduksi Sulfat (SRB). *Jurnal Sistem Teknik Industri* 2005; 6(3).
- Karwur F. Paradoks Oksigen. *BiOS Majalah Ilmiah Semipopuler* 2012; 6(1): 5-16.
- Kasting JF., Zahnle KJ., Pinto JP., Young AT. Sulfur, Ultraviolet Radiation and the Early Evolution of Life. *Origins of Life* 1989; 19:95-108.
- Keserovic A. Geothermal systems in Indonesia-Influence on the Corrosion Resistance of Stainless Steel Materials. Von der Fakultat VI-Planen Bauen Umwelt der Technischen Universitat Berlin zur Erlangung des akademischen Grades. Berlin, Dissertation, 2014.
- King RA, and MJDA. Corrosion by sulphate-reducing bacteria. *Nature* 1971; 233:491- 491.
- Kristianto, Gunawan H, Haerani N, Mulyana I, Basuki A, Primulyana S, Bina Farid U. Gejala Awal Letusan Gunung Lokon Februari 2011-Maret 2012. Badan Geologi Bandung. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi* 2012; 3(3):151-168.
- Kusumadinata K. Data Dasar Gunung Api Indonesia. Direktorat Vulkanologi, 1979.





- Mandeville C. 2010. Sulfur: a Ubiquitous and Useful Tracer in Earth and Planetary Sciences. Dept.of Earth and Planetary Sciences.American Museum of Natural History Central Park.NewYork.Elements 2010; 6: 75-80.
- McDonough WF, Sun SS. The Composition of the Earth.Chemical Geology 1995; 120:223-253.
- Mojzsis S. Precambrian Ophiolites and Related Rocks. Departemen of Geological Sciences, Center for Astrobiology, University of Colorado. Developments in Precambrian Geology2007; 15.DOI:10.1016/S0166-2636(07)15075-1.
- Mojzsis SJ, Coath CD, Greenwood JP, McKeegan KD, Harrison TM. Mass-independent isotope effects in Archean (2,5 to 3,8 Ga) Sedimentary Sulphides Determined by ion Microprobe analysis. Geochimica et Cosmochimica Acta 2003; 67:1635-1658.
- Morgan JW, Anders E. Chemical Composition of Earth, Venus and Mercury. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America. Physical Sciences 1980; 77:6973-6977.
- Pfeffer MA. The Relative Influences of Volcanic and Anthropogenic Emissions on Air Pollution in Indonesia as Studied With a Regional Atmospheric Chemistry and Climate Model.Max Plank Institute for Meteorology. Hamburg, Dissertation, 2007.
- Suhartanti D. Laju Korosi Baja oleh Desulfomicrobium Baculatum dan Desulfomonas Pigra.Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta.Berkala MIPA 2006; 16(1):27-35.
- Supardi R. Korosi. Bandung : Penerbit Tarsito. 1997.
- Taroreh F, Karwur F, Mangimbulude J. 2015. Reduksi Sulfat oleh Bakteri Termofilik dari Air Panas Sarongsong Kota Tomohon.Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan".Yogjakarta. F3:1-6
- Toon OB, Kasting JF, Turco RP, Liu MS.The Sulfur Cycle in the Marine Atmosphere.Journal of Geophysical Res. 1987; 92: 943-963.
- Videla HA, Herrera LK. Microbiologically Influenced Corrosion:Looking to the Future.International Microbiol. 2005; 8:169-180.
- Wiharja. Identifikasi Kualitas gas SO₂ di Daerah Industri Pengecoran Logam Ceper. Badan Pengkajian & Penerapan Teknologi Lingkungan.Jurnal Teknologi Lingkungan 2002; 3(3):251-255.
- Zahnle K, Claire M, Catling D. The Loss of mass-independent fractionation in Sulfur due to a Paleoproterozoic Collapse of Atmospheric Methane.Geobiology J. 2006; 4:271-283.



Lembar Tanya Jawab
Moderator : Soepriyanto (ITS Surabaya)
Notulen : Putri Restu Dewati (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Ramli Sitanggang (UPN "Veteran" Yogyakarta)
Pertanyaan : Data 2,8 Milyar tahun yang lalu dapat dari mana? Kenapa bisa tahu umur batu zaman dahulu? Manakah yang paling berpengaruh: korosi mikrobiologi atau korosi akibat bahan kimia?
Jawaban : Data 2,8 milyar tahun yang lalu itu didapat dari pengambilan usia batuan tertentu, dari catatan Geologi, saya dapat dari Literatur Perhitungan biasanya menggunakan waktu paruh ($T_{1/2}$)
Untuk mana yang paling berpengaruh antara korosi mikrobiologi atau korosi chemicals (bahan kimia), penulis tidak bisa membandingkan secara langsung karena tidak mempelajari tentang korosi akibat bahan kimia. Namun tentang korosi mikrobiologis pengaruhnya cukup membahayakan karena dapat terjadi pada pH netral, dan suhu 10 – 50° termasuk pH pada suhu kamar (25°C)

2. Penanya : Bambang Hari P (UNJANI Cimahi)
Pertanyaan : SRB (sulphate Reducing Bacteria) itu, aerobic atau anaerobic?
Jawaban : SRB sifatnya anaerobic (Hidup tanpa adanya oksigen).

