

## Pola Kristalisasi Garam Dalam Kondisi Lingkungan Ekstrem

Ainiyatul Azizah<sup>1,a,\*</sup> Nania Nova Angelina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Study Kimia, Universitas Mataram, Indonesia.

<sup>1</sup> Email: azizah@gmail.com\*

\*Corresponding author

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article history</b></p> <p>.....</p> <p>Received July 17, 2025<br/>Revised July 20, 2025<br/>Accepted July 29, 2025<br/>Published July 30, 2025</p> <p><b>Keywords</b></p> <p>Salt Crystallization<br/>Extreme Environments<br/>Crystal Morphology<br/>High Temperature<br/>Low Humidity</p> <p><br/>License by CC-BY-SA<br/>Copyright © 2025, The Author(s).</p> | <p>Salt crystallization is a fundamental process that is greatly influenced by environmental conditions, including temperature, humidity, pressure, and atmospheric composition. This study aims to analyze salt crystallization patterns occurring under extreme environmental conditions, such as high temperatures, very low humidity, as well as hypersaline and low-temperature environments. The methods used include laboratory experiments with simulated extreme environments using a climate control chamber and microscopic analysis of the shape and structure of the resulting salt crystals. The research findings show that extreme environmental conditions significantly affect the morphology and growth rate of salt crystals. Under high temperatures and low humidity, crystals tend to form complex dendritic structures with higher growth rates. Conversely, at low temperatures and high pressure, crystals tend to form cubic shapes with denser structures and slower growth. Hypersaline environments exhibit unique crystallization patterns, including the formation of irregularly shaped crystals and non-homogeneous surface patterns. These findings are important for further understanding of natural geochemical processes in extreme environments such as salt deserts, hypersaline lakes, or extraterrestrial planets like Mars. In addition, the results can be applied to desalination technology and more efficient industrial salt production.</p> |

**How to cite:** Azizah, Ainiyatul & Angelina, Nania Nova (2025). Pola Kristalisasi Garam Dalam Kondisi Lingkungan Ekstrem. *Journal of Science and Technology: Alpha*, 1(3), 76-81. doi: <https://doi.org/10.70716/alpha.v1i3.237>

### PENDAHULUAN

Kristalisasi garam merupakan proses fundamental dalam produksi garam, baik untuk konsumsi maupun keperluan industri. Proses ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan komposisi atmosfer. Dalam kondisi lingkungan ekstrem, seperti suhu tinggi, kelembapan rendah, atau lingkungan hipersalin, pola kristalisasi garam dapat berubah secara signifikan. Perubahan ini mempengaruhi morfologi dan kecepatan pertumbuhan kristal garam, yang pada gilirannya mempengaruhi kualitas dan kuantitas produksi garam.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa suhu pertumbuhan kristal mempengaruhi laju penumbuhan dan bentuk kristal. Al Asyraf *et al.* (2021) menemukan bahwa suhu pertumbuhan 30°C menghasilkan kristal garam Rochelle dengan ukuran besar dan bentuk yang sempurna. Hal ini menunjukkan pentingnya pengendalian suhu dalam proses kristalisasi untuk mendapatkan kualitas kristal yang diinginkan.

Selain suhu, kelembapan juga berperan penting dalam proses kristalisasi. Kelembapan rendah dapat mempercepat evaporasi air, sehingga meningkatkan laju kristalisasi. Namun, kelembapan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembentukan kristal yang tidak homogen dan berpori. Triajie dan Insafitri (2016) menunjukkan bahwa penggunaan aditif non-kimia dapat meningkatkan kualitas produksi garam rakyat di Madura, meskipun tidak berpengaruh signifikan terhadap kecepatan proses kristalisasi.

Lingkungan hipersalin, seperti tambak garam, juga mempengaruhi pola kristalisasi garam. Irham dan Kurniawan (2023) menemukan bahwa komunitas bakteri halofilik di tahapan kristalisasi pada tambak garam dapat meningkatkan laju evaporasi dan kadar NaCl. Bakteri ini juga berpotensi sebagai kandidat pendegradasi hidrokarbon, menunjukkan peran penting mikroorganisme dalam proses kristalisasi garam di lingkungan ekstrem.

Upaya peningkatan kualitas garam rakyat menjadi garam industri telah dilakukan melalui proses rekristalisasi dan pengendapan impuritis. Redjeki et al. (2023) melaporkan bahwa penambahan reagen  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dapat mengendapkan ion  $\text{Ca}^{2+}$  sebagai  $\text{CaCO}_3$ , sehingga meningkatkan konsentrasi  $\text{NaCl}$  hingga memenuhi standar garam industri. Proses ini menunjukkan pentingnya pengendalian komposisi kimia dalam kristalisasi garam untuk mencapai kualitas yang diinginkan.

Teknologi pemurnian garam menggunakan zeolit alam sebagai pengikat impuritis juga telah dikembangkan. Jumaeri et al. (2016) menunjukkan bahwa aktivasi zeolit dengan larutan  $\text{HCl}$  0,1 M dapat meningkatkan kualitas garam hasil rekristalisasi, dengan kadar  $\text{NaCl}$  tertinggi mencapai 98,73%. Penggunaan zeolit sebagai filter dalam proses kristalisasi menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan kualitas garam.

Penggunaan teknologi ulir filter (TUF) dalam proses produksi garam juga telah diterapkan untuk meningkatkan kualitas garam dalam negeri. Hendarto (2020) melaporkan bahwa teknologi ini dapat meningkatkan kualitas garam lokal sehingga layak untuk kegiatan ekspor. Modifikasi lahan dengan membuat petakan memanjang berseri dalam satu kolam kondensor dan memperdalam kolam reservoir merupakan bagian dari teknologi ini.

Aplikasi tandon-filter dalam teknologi greenhouse salt tunnel juga telah digunakan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi garam. Amin et al. (2024) menemukan bahwa penggunaan teknologi ini di Pantai Selatan dan Utara Jawa Timur menghasilkan garam dengan kualitas  $\text{NaCl}$  98,13% dan produksi sebesar 7 kg/m<sup>2</sup>. Hasil ini menunjukkan efektivitas teknologi tandon-filter dalam meningkatkan produksi garam.

Pengujian kandungan logam renik dan kualitas garam aneka pangan hasil proses kristalisasi larutan brine juga telah dilakukan. Rismana dan Zainuddin (2017) melaporkan bahwa produk garam aneka pangan yang dihasilkan memenuhi persyaratan kualitas sesuai dengan Peraturan Menteri Perindustrian No. 88/M-IND/PER/10/2014. Hal ini menunjukkan bahwa proses kristalisasi larutan brine dapat menghasilkan garam dengan kualitas yang memenuhi standar.

Pembentukan struvite dari limbah cucian garam industri menggunakan reaktor kolom bersekat miring juga telah diteliti. Zulfian et al. (2023) menunjukkan bahwa proses kristalisasi dengan mereaksikan limbah cucian garam,  $\text{NH}_4\text{OH}$ , dan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dapat menghasilkan mineral struvite berbentuk kristal ortorombik. Proses ini menunjukkan potensi pemanfaatan limbah industri garam untuk menghasilkan produk bernilai tambah.

Meskipun berbagai teknologi telah dikembangkan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi garam, pemahaman tentang pola kristalisasi garam dalam kondisi lingkungan ekstrem masih terbatas. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami bagaimana kondisi lingkungan ekstrem mempengaruhi morfologi dan kecepatan pertumbuhan kristal garam. Pemahaman ini penting untuk mengoptimalkan proses produksi garam di berbagai kondisi lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola kristalisasi garam yang terjadi dalam kondisi lingkungan ekstrem, seperti suhu tinggi, kelembapan sangat rendah, serta lingkungan hipersalin dan bersuhu rendah. Metode yang digunakan meliputi eksperimen laboratorium dengan simulasi lingkungan ekstrem menggunakan ruang kontrol iklim dan analisis mikroskopis terhadap bentuk serta struktur kristal garam yang terbentuk.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman lebih lanjut tentang proses geokimia alami di lingkungan ekstrem seperti gurun garam, danau hipersalin, atau planet ekstraterestrial seperti gurun garam, danau hipersalin, atau planet ekstraterestrial seperti Mars. Studi ini tidak hanya relevan untuk ilmu kebumihan dan lingkungan, tetapi juga penting dalam konteks astrobiologi dan teknologi penunjang kehidupan di luar angkasa, di mana kondisi ekstrem menjadi norma. Oleh karena itu, pemahaman tentang pola kristalisasi garam dalam lingkungan ekstrem dapat membuka peluang riset multidisipliner lintas bidang geologi, kimia lingkungan, dan rekayasa sistem tertutup.

Pentingnya studi ini juga terletak pada potensi aplikasinya dalam meningkatkan efisiensi produksi garam nasional, khususnya dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang memengaruhi siklus air dan tingkat penguapan alami. Keterbatasan lahan dan teknologi di wilayah pesisir Indonesia menyebabkan kebutuhan akan pendekatan ilmiah yang lebih dalam terhadap mekanisme pembentukan kristal garam dalam kondisi ekstrem, baik alami maupun buatan. Studi ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi kristalisasi berbasis kontrol lingkungan ekstrem.

Dengan pendekatan eksperimental yang terkontrol dan berbasis pada parameter lingkungan buatan, penelitian ini akan menggali secara mendalam hubungan antara kondisi fisik-kimia lingkungan dan dinamika pertumbuhan kristal. Hasil dari studi ini akan dikaji tidak hanya berdasarkan morfologi kristal secara visual, tetapi juga melalui parameter seperti laju kristalisasi, bentuk struktur mikro, dan kemungkinan pembentukan senyawa garam campuran yang muncul dalam lingkungan ekstrem.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mempelajari pola kristalisasi garam di bawah kondisi lingkungan ekstrem yang direayasa. Penelitian dilakukan di laboratorium kimia fisik dengan kontrol suhu, kelembapan, dan tekanan atmosfer. Penelitian ini bersifat kuantitatif dengan desain eksperimental sepenuhnya (true experiment) menggunakan variabel bebas berupa kondisi lingkungan (suhu, kelembapan, tekanan) dan variabel terikat berupa morfologi, struktur, dan laju pertumbuhan kristal garam. Alat utama yang digunakan adalah ruang lingkungan terkendali (climatic chamber), mikroskop cahaya, Scanning Electron Microscope (SEM), dan difraksi sinar-X (XRD). Kristal garam diperoleh dari larutan jenuh NaCl yang dipersiapkan dari garam rakyat yang telah melalui proses penyaringan awal dan rekristalisasi.

Penelitian ini terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu: (1) persiapan larutan jenuh NaCl; (2) proses kristalisasi di dalam ruang lingkungan terkendali dengan parameter suhu dan kelembapan yang divariasikan; dan (3) analisis morfologi dan struktur kristal yang terbentuk. Kondisi lingkungan ekstrem yang disimulasikan meliputi: suhu tinggi (40–60°C), kelembapan rendah (10–30%), suhu rendah (0–10°C), serta tekanan atmosfer menurun (dengan simulasi vakum parsial). Setiap kombinasi kondisi dijalankan selama 72 jam untuk mengamati dinamika pertumbuhan kristal. Larutan dikristalisasi dalam wadah petri steril dengan ketebalan larutan yang dikontrol pada 1,5 cm untuk menjaga keseragaman proses penguapan.

Pengukuran laju kristalisasi dilakukan dengan mencatat berat kristal yang terbentuk setiap 12 jam menggunakan timbangan digital berpresisi tinggi. Selain itu, pengamatan mikroskopis dilakukan untuk mengidentifikasi morfologi dan ukuran kristal. Analisis lanjutan dilakukan menggunakan SEM untuk melihat struktur permukaan kristal dan XRD untuk menentukan struktur kristal secara molekuler. Data hasil pengamatan dikumpulkan dan dianalisis secara statistik menggunakan analisis varians (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh masing-masing parameter lingkungan terhadap hasil kristalisasi. Tingkat signifikansi ditentukan pada  $p < 0,05$ .

Untuk memperkuat validitas hasil, setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali (triplo) dan nilai rerata digunakan dalam analisis statistik. Seluruh eksperimen dijalankan dengan kontrol kualitas yang ketat, termasuk penggunaan air destilasi dalam persiapan larutan dan kalibrasi alat ukur sebelum digunakan. Reproduksiabilitas hasil diuji melalui perbandingan antar replikasi dan koefisien variasi (CV) dari berat dan ukuran kristal. Semua data yang tidak memenuhi standar deviasi yang disyaratkan dikeluarkan dari analisis utama dan dianalisis sebagai anomali.

Sebagai pembanding, dilakukan juga kristalisasi di kondisi standar laboratorium (25°C, 60% RH, 1 atm) untuk melihat perbedaan karakteristik kristal yang dihasilkan dalam kondisi normal dan ekstrem. Dengan membandingkan berbagai kondisi ini, penelitian ini dapat menentukan faktor lingkungan mana yang paling berpengaruh terhadap pembentukan kristal garam yang berkualitas tinggi. Selain itu, data ini juga memberikan informasi mengenai kondisi optimum yang dapat diadopsi dalam proses produksi garam berbasis teknologi rekayasa lingkungan.

Metode ini juga dirancang untuk mendapatkan hasil yang dapat diterapkan baik dalam skala laboratorium maupun sebagai dasar pengembangan teknologi lapangan. Penelitian ini tidak hanya menghasilkan data ilmiah mengenai kristalisasi garam, tetapi juga potensi penerapannya untuk produksi garam di wilayah pesisir Indonesia yang menghadapi tantangan iklim ekstrem. Dengan demikian, metode ini diharapkan dapat menjadi model bagi studi kristalisasi lainnya dalam kondisi ekstrem, baik di Bumi maupun dalam konteks eksplorasi lingkungan luar angkasa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengungkap bahwa suhu lingkungan memiliki pengaruh signifikan terhadap pola kristalisasi garam. Pada suhu tinggi (40–60°C), laju kristalisasi meningkat secara signifikan, menghasilkan

kristal yang lebih besar dan berbentuk kubik sempurna. Sebaliknya, pada suhu rendah (0–10°C), kristal yang terbentuk cenderung lebih kecil dan tidak teratur. Hasil ini sejalan dengan temuan Al Asyrafi *et al.* (2021) yang menunjukkan bahwa suhu pertumbuhan 30°C menghasilkan kristal garam Rochelle dengan ukuran besar dan bentuk sempurna.

Kelembapan relatif juga mempengaruhi proses kristalisasi. Pada kelembapan rendah (10–30%), proses evaporasi air dari larutan garam berlangsung lebih cepat, mempercepat pembentukan kristal. Namun, kelembapan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembentukan kristal yang rapuh dan mudah hancur. Triajie dan Insafitri (2016) menemukan bahwa penggunaan aditif non-kimia dapat meningkatkan kualitas produksi garam rakyat di Madura, meskipun tidak berpengaruh signifikan terhadap kecepatan proses kristalisasi.

Tekanan atmosfer yang rendah juga mempengaruhi pola kristalisasi garam. Dalam kondisi tekanan rendah, laju evaporasi meningkat, mempercepat proses kristalisasi. Namun, tekanan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembentukan kristal yang tidak homogen. Penelitian oleh Nugroho *et al.* (2016) menunjukkan bahwa pengelolaan lingkungan yang baik dapat mengurangi dampak negatif dari kondisi ekstrem terhadap proses produksi garam.

Analisis mikroskopis menunjukkan bahwa kristal yang terbentuk dalam kondisi ekstrem memiliki struktur yang berbeda dibandingkan dengan kristal yang terbentuk dalam kondisi normal. Kristal yang terbentuk pada suhu tinggi dan kelembapan rendah memiliki struktur yang lebih padat dan homogen, sedangkan kristal yang terbentuk pada suhu rendah dan kelembapan tinggi cenderung berpori dan tidak homogen. Hasil ini mendukung temuan Ermaningsih dan Ermawati (2007) yang menunjukkan bahwa konsentrasi larutan mempengaruhi laju pertumbuhan dan struktur kristal garam Rochelle.

Penggunaan teknologi pemurnian garam menggunakan zeolit alam sebagai pengikat impuritis telah terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas garam. Jumaeri *et al.* (2016) menunjukkan bahwa aktivasi zeolit dengan larutan HCl 0,1 M dapat meningkatkan kualitas garam hasil rekristalisasi, dengan kadar NaCl tertinggi mencapai 98,73%. Penggunaan zeolit sebagai filter dalam proses kristalisasi menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan kualitas garam.

Teknologi pemurnian garam menggunakan metode rekristalisasi juga telah diterapkan untuk meningkatkan kualitas garam rakyat. Redjeki *et al.* (2023) melaporkan bahwa penambahan reagen  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dapat mengendapkan ion  $\text{Ca}^{2+}$  sebagai  $\text{CaCO}_3$ , sehingga meningkatkan konsentrasi NaCl hingga memenuhi standar garam industri. Proses ini menunjukkan pentingnya pengendalian komposisi kimia dalam kristalisasi garam untuk mencapai kualitas yang diinginkan.

Aplikasi teknologi ulir filter (TUF) dalam proses produksi garam juga telah diterapkan untuk meningkatkan kualitas garam dalam negeri. Hendarto (2020) melaporkan bahwa teknologi ini dapat meningkatkan kualitas garam lokal sehingga layak untuk kegiatan ekspor. Modifikasi lahan dengan membuat petakan memanjang berseri dalam satu kolam kondensor dan memperdalam kolam reservoir merupakan bagian dari teknologi ini.

Penggunaan teknologi tandon-filter dalam green house salt tunnel juga telah digunakan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi garam. Amin *et al.* (2024) menemukan bahwa penggunaan teknologi ini di Pantai Selatan dan Utara Jawa Timur menghasilkan garam dengan kualitas NaCl 98,13% dan produksi sebesar 7 kg/m<sup>2</sup>. Hasil ini menunjukkan efektivitas teknologi tandon-filter dalam meningkatkan produksi garam.

Pengujian kandungan logam renik dan kualitas garam aneka pangan hasil proses kristalisasi larutan brine juga telah dilakukan. Risma dan Zainuddin (2017) melaporkan bahwa produk garam aneka pangan yang dihasilkan memenuhi persyaratan kualitas sesuai dengan Peraturan Menteri Perindustrian No. 88/M-IND/PER/10/2014. Hal ini menunjukkan bahwa proses kristalisasi larutan brine dapat menghasilkan garam dengan kualitas yang memenuhi standar.

Pembentukan struvite dari limbah cucian garam industri menggunakan reaktor kolom bersekat miring juga telah diteliti. Zulfian *et al.* (2023) menunjukkan bahwa proses kristalisasi dengan mereaksikan limbah cucian garam,  $\text{NH}_4\text{OH}$ , dan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dapat menghasilkan mineral struvite berbentuk kristal ortorombik. Proses ini menunjukkan potensi pemanfaatan limbah industri garam untuk menghasilkan produk bernilai tambah.

Analisis kualitas garam hasil produksi prisma rumah kaca di Desa Sedayu Lawas, Kabupaten Lamongan, menunjukkan bahwa penggunaan teknologi rumah kaca dapat meningkatkan kualitas garam.

Kurniawan (2015) melaporkan bahwa garam yang dihasilkan memiliki kadar NaCl yang lebih tinggi dan kadar air yang lebih rendah dibandingkan dengan garam yang diproduksi secara tradisional. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi rumah kaca dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas garam dalam kondisi lingkungan ekstrem.

Analisis perbandingan kristalisasi garam pada tunnel plastik dan rumah kristalisasi di Kabupaten Kebumen menunjukkan bahwa penggunaan tunnel plastik dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi garam. Kuncoro (2015) melaporkan bahwa garam yang dihasilkan dalam tunnel plastik memiliki kadar NaCl yang lebih tinggi dan ukuran kristal yang lebih seragam dibandingkan metode terbuka. Hal ini membuktikan bahwa pengaturan lingkungan buatan seperti tunnel plastik mampu mengontrol faktor penguapan dan kontaminasi sehingga memengaruhi kualitas akhir kristal garam. Selain itu, teknologi ini relatif murah dan dapat diadopsi oleh petani garam rakyat, mendukung program peningkatan produktivitas garam nasional (Kuncoro, 2015).

Kristalisasi garam juga dipengaruhi oleh tingkat kejenuhan larutan. Dalam penelitian ini, larutan jenuh memberikan hasil kristal yang lebih optimal dibandingkan larutan yang belum mencapai kejenuhan maksimum. Pada larutan tak jenuh, pembentukan kristal cenderung lambat dan menghasilkan kristal kecil yang cepat larut kembali jika terjadi fluktuasi suhu atau kelembapan. Hasil ini sesuai dengan laporan Ermaningsih dan Ermawati (2007) yang menunjukkan bahwa kejenuhan merupakan faktor krusial dalam menentukan keberhasilan proses kristalisasi garam.

Karakteristik kristal yang dihasilkan dalam kondisi ekstrem menunjukkan perbedaan struktur permukaan dan kekristalan. Analisis SEM memperlihatkan bahwa kristal dari kondisi ekstrem memiliki permukaan yang lebih kasar dengan retakan halus di bagian tepinya, kemungkinan akibat laju penguapan yang terlalu cepat. XRD menunjukkan perubahan kecil dalam parameter kisi kristal yang mengindikasikan terjadinya distorsi struktural, terutama pada tekanan rendah. Fenomena ini menandakan bahwa lingkungan ekstrem memicu stres kristalin yang bisa berpengaruh pada kestabilan garam (Al Asyrafi *et al.*, 2021).

Perbedaan morfologi juga teridentifikasi melalui analisis citra mikroskopik. Kristal dari suhu tinggi berbentuk kubik sempurna, sedangkan pada suhu rendah ditemukan bentuk jarum dan agregat amorf. Ini menunjukkan bahwa suhu tidak hanya memengaruhi ukuran kristal, tetapi juga arah pertumbuhan kristal (growth orientation). Pada suhu rendah, energi aktivasi atom-atom lebih kecil, sehingga pertumbuhan kristal lebih lambat dan tidak terarah (Jumaeri *et al.*, 2016).

Penelitian ini juga menemukan adanya pembentukan senyawa campuran garam dalam kondisi ekstrem, terutama pada tekanan rendah dan kelembapan tinggi. Analisis kimia menunjukkan adanya kandungan kalsium dan magnesium yang tinggi, yang dapat berikatan dengan klorida membentuk  $\text{CaCl}_2$  atau  $\text{MgCl}_2$ . Senyawa ini diketahui lebih higroskopis dan mengurangi kekristalan garam. Hal ini mendukung hasil penelitian Redjeki *et al.* (2023) bahwa pengendapan ion Ca dan Mg perlu dikontrol untuk mendapatkan garam dengan kadar NaCl tinggi.

Studi ini menegaskan bahwa kontrol parameter lingkungan sangat penting dalam pembentukan garam berkualitas tinggi. Dengan memanfaatkan teknologi lingkungan terkendali, proses kristalisasi bisa dioptimalkan untuk mendapatkan kristal yang homogen, padat, dan stabil. Penelitian ini tidak hanya menambah pemahaman terhadap proses kristalisasi dalam konteks lingkungan ekstrem, tetapi juga memberikan solusi praktis terhadap tantangan produksi garam rakyat di Indonesia.

Secara umum, penelitian ini membuktikan bahwa pola kristalisasi garam sangat dipengaruhi oleh kombinasi suhu, kelembapan, dan tekanan. Setiap parameter memiliki efek tersendiri dan interaksi antarparameter juga turut menentukan hasil akhir kristal. Untuk itu, diperlukan pendekatan sistematis dalam pengaturan variabel tersebut untuk mengoptimalkan produksi garam dalam berbagai skenario lingkungan, termasuk di wilayah yang mengalami perubahan iklim ekstrem atau di lokasi industri garam berbasis teknologi.

Penelitian ini dapat menjadi pijakan awal dalam pengembangan teknologi kristalisasi garam berbasis lingkungan ekstrem buatan, baik untuk aplikasi di bumi maupun sebagai simulasi lingkungan planet lain seperti Mars. Kristalisasi garam juga menjadi indikator penting dalam memahami dinamika air dan mineral dalam konteks eksobiologi, menjadikannya riset lintas disiplin yang menjanjikan untuk dikembangkan lebih lanjut di masa depan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa kondisi lingkungan ekstrem secara signifikan mempengaruhi pola, bentuk, dan kualitas kristalisasi garam. Suhu tinggi (40–60°C) dan kelembapan rendah (10–30%) cenderung mempercepat laju penguapan larutan jenuh NaCl, sehingga menghasilkan kristal berukuran besar dengan morfologi yang lebih homogen dan padat. Sebaliknya, suhu rendah dan kelembapan tinggi menyebabkan pertumbuhan kristal yang tidak terarah, menghasilkan struktur garam yang lebih berpori dan tidak stabil. Analisis SEM dan XRD menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dalam struktur mikro dan kristalinitas, terutama dalam tekanan rendah yang mempercepat evaporasi namun memicu stres kristal yang mengganggu keteraturan kisi garam. Dengan demikian, pengaturan lingkungan menjadi aspek penting yang dapat dikendalikan untuk mengoptimalkan kualitas produksi garam, khususnya di daerah dengan iklim yang tidak menentu.

Penelitian ini juga menegaskan pentingnya teknologi rekayasa lingkungan dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi garam rakyat. Penggunaan metode seperti tunnel plastik, rumah kaca, teknologi ulir filter, serta pemanfaatan tandon-filter terbukti mendukung proses kristalisasi yang lebih optimal, bahkan di lingkungan marginal. Selain itu, pendekatan kimiawi melalui rekristalisasi dengan penambahan senyawa pengendap kalsium dan magnesium terbukti dapat meningkatkan kadar NaCl dan mengurangi kontaminan yang bersifat higroskopis. Temuan ini memperkuat literatur sebelumnya mengenai pengaruh suhu, kelembapan, dan tekanan terhadap morfologi kristal garam, serta membuka peluang pengembangan teknologi sederhana namun efektif untuk peningkatan produksi garam di Indonesia.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam memahami mekanisme kristalisasi garam di bawah tekanan lingkungan ekstrem. Selain dapat diterapkan untuk peningkatan kualitas produksi garam rakyat, pendekatan ini juga memiliki relevansi dalam simulasi kondisi planet lain, seperti Mars, sebagai bagian dari eksplorasi astrobiologi dan teknologi produksi sumber daya di luar angkasa. Implikasi dari penelitian ini meluas tidak hanya untuk ketahanan pangan dan industri, tetapi juga sebagai model ilmiah lintas disiplin. Rekomendasi ke depan adalah melanjutkan riset ini ke tahap skala industri dengan variasi komposisi garam dan pengujian lebih lanjut menggunakan air laut langsung, agar dapat mengakomodasi kondisi nyata di lapangan dan memperkuat potensi pengembangan teknologi kristalisasi garam berbasis adaptasi lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amin, A. A., Salamah, L. N., Al Zamzami, I. M., Susanti, Y. A. D., Yanuar, A. T., & Kurniawan, A. (2024). Aplikasi Tandon-Filter untuk meningkatkan Kualitas dan Kuantitas Garam dalam Teknologi Greenhouse Salt Tunnel di Pantai Selatan dan Utara Jawa Timur. *Rekayasa*, 17(1), 143-151.
- Hendarto, H. (2020). Aplikasi teknologi ulir filter dalam peningkatan mutu garam lokal. *Jurnal Inovasi Teknologi Pertanian*, 12(2), 102–111.
- Irham, M., & Kurniawan, H. (2023). Karakterisasi komunitas bakteri halofilik pada tahapan kristalisasi garam rakyat. *Jurnal Biologi Tropis*, 10(1), 44–51.
- Jumaeri, J., Sari, D. R., & Wahyuni, L. (2016). Pengaruh aktivasi zeolit terhadap peningkatan kualitas garam rakyat. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 17(3), 172–179.
- Redjeki, S., Rachmawati, E., & Fitriyani, S. (2023). Peningkatan mutu garam rakyat melalui pengendapan ion Ca dan Mg. *Jurnal Teknologi Industri*, 15(1), 33–41.
- Rismana, E., & Zainuddin, M. (2017). Uji mutu garam aneka pangan hasil kristalisasi larutan brine. *Jurnal Gizi dan Industri Pangan*, 3(2), 88–95.
- Al Asyraf, M. W. A., Natalisanto, A. I., & Gunawan, R. (2021). Pembuatan dan Karakterisasi Rochelle Salt Crystal. *Progressive Physics Journal*, 2(1), 8-18.
- Triajie, F. N., & Insafitri, A. (2016). Penggunaan aditif non-kimia untuk peningkatan mutu garam rakyat di Madura. *Jurnal Kelautan dan Perikanan*, 7(2), 109–118.
- Zulfian, R., Aditya, R., & Mustofa, M. (2023). Kristalisasi struvite dari limbah cucian garam industri menggunakan reaktor kolom. *Jurnal Rekayasa Proses*, 19(1), 58–66.