

CORRELATION ANALYSIS OF RADICAL POLYMERIZATION REACTOR OPERATING CONDITIONS TO INDUSTRIAL SCALE SWELLING CAPACITY OF SUPERABSORBENT

Willy Aulia Ilham¹, Teguh Kurniawan^{2*}, Saepurahman³, Ratna Sari Siti Aisyah⁴

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, Pascasarjana, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Raya Jakarta Km.4 Pakupatan, Serang, 42122, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jenderal Sudirman km.3, Cilegon, 42435, Indonesia

³BRIN, Jl Raya Puspiptek - Kota Tangerang Selatan – Banten

⁴Jurusan Pendidikan Kimia, FKIP, Jl Ciwaru Raya No. 25, Serang

E-mail : *teguh@untirta.ac.id

Received: 17 Januari 2023. Accepted: 30 Juni 2023. Published: 30 Juli 2023

DOI: 10.30870/educhemia.v8i2.18853

Abstract: Superabsorbent polymer (SAP) is a polymer that has one function as an absorbent material in baby diapers, whose quality is determined by the number of swelling capacity (SC). Many previous studies regarding the effect of synthesis parameters on the number of SC were limited to the laboratory scale, where the polymerization conditions, the number of variables, and SC data obtained were very limited, in contrast to the industrial scale. The radical polymerization stage, with its accompanying operating variables such as reaction temperature, monomer concentration, retention time, crosslinker concentration, the addition of nitrogen gas, and initiator concentration, affects the value of SC in industrial-scale production. This study aims to analyse the correlation between the reactor operating conditions and the number of SAP SC obtained. Correlation data analysis was done using Microsoft Excel with Data Analysis Toolpak and Python by utilizing production data with a total of 1,562 entries, where the correlation between each variable was calculated using Pearson's correlation coefficient. The analysis determined that the variables that had the strongest correlation with the SC were retention time and reaction temperature, with correlation coefficient values of 0.31 and -0.26. The weakest correlation was obtained from the addition of nitrogen gas and an initiator with a value of -0.07 and -0.02. Positive values indicate a relationship that is directly proportional, while negative values indicate an inverse relationship. Based on the correlation analyses and trends, the ideal polymerization conditions have been identified.

Keywords: superabsorbent polymer, radical polymerization, swelling capacity, correlation data analysis

Abstrak: Superabsorbent polymer (SAP) merupakan polimer yang memiliki salah satu fungsi sebagai bahan penyerap pada popok bayi yang kualitasnya ditentukan oleh nilai Swelling Capacity (SC). Banyak penelitian sebelumnya mengenai pengaruh parameter sintesis terhadap nilai SC akan tetapi masih terbatas pada skala laboratorium dimana kondisi polimerisasi, jumlah variabel dan data SC yang diperoleh sangat terbatas berbeda dengan skala industri. Variabel kondisi operasi polimerisasi radikal seperti suhu reaksi, konsentrasi monomer, *retention time*, konsentrasi pengikat silang, penambahan gas nitrogen dan konsentrasi inisiator mempengaruhi nilai SC dalam produksi skala industri. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis korelasi antara kondisi operasi reaktor dengan nilai SC SAP yang diperoleh. Analisis korelasi data dilakukan menggunakan microsoft excel dengan toolpak dan python. Analisis data dengan memanfaatkan data produksi dengan total 1.562 data dimana korelasi antar variabel dihitung menggunakan koefisien korelasi Pearson. Berdasarkan analisis diperoleh variabel yang memiliki korelasi paling kuat dengan SC adalah *retention time* dan suhu reaksi dengan nilai koefisien korelasi 0,31 dan -0,26. Korelasi terlemah diperoleh dari penambahan gas nitrogen dan inisiator dengan nilai -0,07 dan -0,02. Nilai positif menunjukkan hubungan yang berbanding lurus sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik. Berdasarkan analisis korelasi dan *trend*, kondisi polimerisasi yang ideal telah diidentifikasi.

Kata kunci: superabsorbent polymer, polimerisasi radikal, swelling capacity, analisis korelasi data

PENDAHULUAN

Superabsorbent polymer (SAP) merupakan polimer yang mempunyai banyak fungsi dalam kehidupan manusia modern. Beberapa fungsi dari polimer ini adalah sebagai media penyerap air pada popok bayi, manula dan pembalut wanita (Zohurriaan Mohammad J & Mehr. 2008), media pelembab tanah pada dunia pertanian dengan mengurangi laju penguapan (Ostrand et al. 2020), meningkatkan efisiensi penggunaan air pada sektor pertanian (Oladosu et al. 2022), sebagai bahan untuk pengolahan limbah (Dave & Gor. 2018), zat pencampur pada *concrete* dan material semen (He et al. 2019), sebagai bahan penyerap pada *mortuary* dan *surgical pads* di dunia medis, mainan anak-anak,

gel tahan api, *flood bags* untuk mitigasi bencana banjir, *sealing agent* pada kabel bahkan digunakan untuk salju artifisial, absorben dalam pengiriman obat dan rekayasa jaringan organ (Rakhmawati & Kurniawan, 2019).

SAP bersifat hidrofilik/suka air dan tidak larut apabila bereaksi dengan air. Produk yang termasuk dalam kategori superabsorben harus memiliki kemampuan menyerap air dengan nilai standar berkisar antara 10-1.000 kali berat keringnya (Budiman Anwar & Nurkomarasari Risa, 2021).

Kualitas dari SAP salah satunya ditentukan oleh *swelling capacity*. *Swelling capacity* adalah kemampuan SAP untuk menahan cairan setelah dalam kondisi jenuh yang dinyatakan dalam

gram cairan yang tertahan per gram berat SAP kering (gram H₂O/gram *dry* SAP). Semakin tinggi nilai *swelling capacity* maka akan semakin baik kualitas SAP (Bachra et al. 2020). Kualitas yang baik tentu saja akan meningkatkan nilai ekonomi, kepuasan *customer* dan *profit* untuk industri.



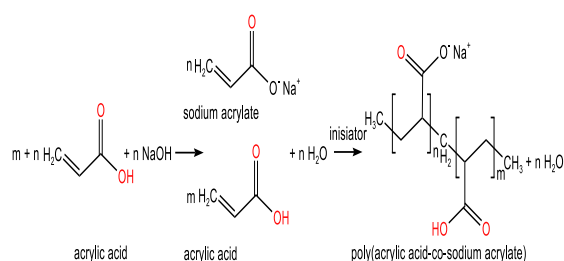
Gambar 1. Superabsorbent polymer sebelum dan sesudah swelling

Proses produksi SAP menggunakan polimerisasi adisi radikal bebas. Polimerisasi ini ditandai dengan proses pertumbuhan atau penambahan monomer yang saling berikatan membentuk rantai polimer. Polimerisasi ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu inisiasi, propagasi, transfer rantai, dan terminasi (Konstantinov & Broadbelt. 2019).

Polimerisasi radikal termasuk salah satu jenis polimerisasi adisi. Polimerisasi adisi merupakan reaksi yang terjadi karena adanya monomer aktif yang mempunyai satu elektron bebas tidak berpasangan (radikal bebas). Polimerisasi radikal bebas SAP mempunyai tantangan yaitu reaksinya relatif susah dikontrol

karena sensitif terhadap panas dan suhu. Radikal yang terbentuk relatif tidak homogen ketika terjadi perubahan atau kenaikan suhu (Swantomo et al. 2008).

Polimerisasi radikal juga relatif sulit dikontrol ketika masuk fasa gel. Selain itu polimer yang dihasilkan juga mempunyai struktur dan berat molekul yang fluktuatif dan susah untuk dikontrol (Sunit. 2010). Polimerisasi radikal dilakukan dengan cara penambahan inisiator yang bersifat radikal dan terlarut ke monomer pada fase cair. Saat reaksi berlangsung, campuran menjadi lebih kental. Reaksinya bersifat eksotermik dan polimer yang dihasilkan memiliki berat molekul yang relatif heterogen (Hamzah. 2017). Polimerisasi radikal bebas terdiri dari tiga tahapan : inisiasi, propagasi dan terminasi.



Gambar 2. Reaksi pembentukan SAP (Khanlari & Dubé, 2015)

SAP dalam skala industri biasanya bersifat *petroleum based* yang diproduksi dari bahan baku berupa Asam akrilat (AA) dan NaOH. Reaksi asam basa AA

dengan NaOH merupakan reaksi netralisasi yang eksotermis pada *monomer preparation* dengan hasil berupa garam sodium akrilat dan air.

Selanjutnya reaksi polimerisasi terjadi pada reaktor. SAP disintesis melalui polimerisasi secara radikal bebas. Sodium akrilat dengan ditambahkan inisiator dan pengikat silang akan membentuk gel polisodium akrilat dan poliakrilat (SAP) (Meshram et al. 2020).

Gel elastis hasil polimerisasi dikeringkan, dihancurkan dan diayak untuk mendapatkan ukuran partikel yang diperlukan. Sebelum pengeringan gel dikurangi ukurannya untuk meningkatkan luas permukaan dan mempercepat proses pengeringan.

Proses pengeringan dilakukan dengan *dryer*. Udara panas yang dipanaskan menggunakan *steam* digunakan untuk menguapkan air pada gel, sehingga gel berubah menjadi *powder* SAP yang kering. *Powder* kemudian digiling dan diayak untuk mengatur distribusi ukuran partikelnya. Ukuran *powder* yang terlalu besar dan kecil *directly* sedangkan ukuran yang ideal sebagai produk dilakukan *surface coating* (Meshram et al. 2020).

Nilai *swelling capacity* dipengaruhi oleh banyak variabel pada tahapan polimerisasi radikal SAP di reaktor,

diantaranya adalah jenis dan konsentrasi stabilizer atau pengikat silang (*crosslinker agent*), impurities, suhu polimerisasi (Brand et al. 2011), waktu reaksi, jenis dan konsentrasi inisiator (Jafari et al. 2021), jenis dan konsentrasi monomer, metode polimerisasi, jenis dan jumlah surfaktan yang digunakan, kondisi pengaduk/reaktor dan laju pengadukan, jenis dan jumlah porogen, metode, suhu, dan waktu pengeringan, jenis dan konsentrasi pengikat silang permukaan (Zohuriaan Mohammad J & Mehr. 2008).

Analisis korelasi data adalah metode evaluasi statistik yang dilakukan terhadap derajat/kekuatan hubungan linier dua variabel sehingga dapat diketahui apakah variabel tersebut mempunyai hubungan yang kuat, lemah atau tidak berhubungan. Selain itu juga dapat diketahui apakah dua variabel tersebut mempunyai hubungan searah atau berlawanan arah. Interval nilai korelasi adalah $-1 \leq r \leq 1$. Semakin tinggi nilai korelasinya dengan mendekati 1 maka hubungan antara dua variabel tersebut semakin kuat. Sebaliknya jika nilainya mendekati nilai 0 maka hubungannya semakin lemah. Tanda negatif menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik, sebaliknya tanda positif menunjukkan hubungan

yang berbanding lurus. (Amalia & Kumoro, 2016).

Korelasi Pearson merupakan jenis korelasi sederhana yang sering digunakan untuk menganalisis hubungan linier dari dua variabel yang skala datanya berupa interval atau rasio dengan interval korelasi -1 sampai 1 (Windarto, 2020). Teknik korelasi ini menghubungkan satu variabel terikat (*dependent*) dan satu variabel bebas (*independent*). Koefisien pada Korelasi Pearson berfungsi sebagai ukuran/derajat kekuatan/keeratan dari hubungan dua variabel yang linier. Nilai kekuatan korelasi dapat dilihat pada Tabel 1 (Asuero et al. 2006).

Tabel 1. Kekuatan korelasi

Nilai korelasi r	Interpretasi
0.00 - 0.29	Sangat Rendah
0.30 - 0.49	Rendah
0.50 - 0.69	Moderat
0.70 - 1.89	Tinggi
0.90 - 1.00	Sangat Tinggi

Banyak penelitian yang telah dilakukan terhadap SAP khususnya dalam peningkatan *swelling capacity*, akan tetapi penelitian baru terbatas pada skala laboratorium. Hasil penelitian dari laboratorium dapat digunakan sebagai referensi akan tetapi belum tentu bisa mewakili kondisi aktual di industri secara komprehensif.

Studi literatur dan observasi di industri menunjukkan belum adanya kajian terhadap nilai SC dari SAP pada polimerisasi radikal skala industri. Kajian-kajian terdahulu masih pada skala laboratorium. Selain itu observasi langsung pada reaktor di lapangan menunjukkan bahwa reaksi polimerisasi radikal bersifat fluktuatif dan sangat mempengaruhi nilai SC dari SAP. Nilai SC yang diperoleh terkadang tidak stabil dan dipengaruhi oleh banyak faktor pada kondisi operasi reaktor. Berdasarkan studi literatur, polimerisasi radikal bersifat relatif susah dikontrol dan sensitif.

Penelitian skala industri perlu dilakukan untuk melihat bagaimana nilai *swelling capacity* berhubungan dengan banyak faktor/variabel pada polimerisasi radikal. Selain itu untuk mendapatkan *swelling capacity* yang stabil diperlukan analisis yang berhubungan dengan kondisi operasi reaktor. Analisis korelasi terhadap kondisi operasi *realtime* dan *steady* pada polimerisasi radikal skala industri belum pernah dilakukan sebelumnya. Ketersediaan data yang berlimpah di industri dapat digunakan dan dianalisis sebagai studi hubungan variabel-variabel yang kompleks pada tahapan polimerisasi di reaktor dengan *swelling capacity* SAP.

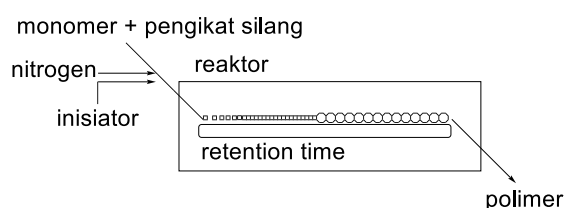
Beberapa faktor yang akan dikaji berdasarkan kajian literatur secara *chemical engineering first principles* adalah kondisi operasi reaktor: suhu reaksi, konsentrasi dari monomer, *retention time*, konsentrasi pengikat silang, penambahan gas nitrogen dan konsentrasi inisiator.

Studi *swelling capacity* dilakukan pada polimerisasi radikal skala industri yang kompleks dengan menggunakan *machine learning* untuk analisis korelasi variabel-variabel kondisi operasi reaktor berdasarkan data aktual yang jumlahnya sangat banyak di lapangan. Hal ini belum pernah dilakukan sebelumnya. Hasil yang didapat akan dikaji dengan kombinasi teori-teori ilmiah dan hubungan kausalitasnya. Kombinasi antara analisis secara *chemical engineering principles* dengan *machine learning* merupakan hal yang masih jarang dilakukan.

METODE

Skema polimerisasi radikal pada reaktor dan variabel yang mempengaruhi kualitas SAP berupa SC dapat dilihat pada Gambar 3. Pertama sekali pengikat silang ditambahkan kepada monomer sedangkan air ditambahkan untuk mengatur konsentrasi dari monomer. Sebelum masuk reaktor, inisiator dan nitrogen juga ditambahkan ke monomer.

Pada reaktor terjadi reaksi polimerisasi monomer menjadi gel SAP basah dalam waktu tertentu yang kemudian dikeringkan pada *dryer* ditahap selanjutnya. SC merupakan kemampuan SAP untuk tetap menyimpan urine/*saline water* di dalam partikel *powder* apabila dipisahkan dengan mesin pemutar (*centrifuge*).



Gambar 3. Skema polimerisasi radikal pada reaktor

Korelasi antara variabel-variabel kondisi operasi pada tahapan polimerisasi radikal di reaktor diperoleh dengan *machine learning* dengan metode *Correlation Data Analysis* menggunakan Ms. Excel dengan toolpak dan Python.

Variabel bebas (x) adalah suhu reaksi, pengikat silang, penambahan gas nitrogen, inisiator, konsentrasi monomer dan *retention time*. Variabel terikat (y) adalah *swelling capacity* (SC). Koefisien korelasi dihitung menggunakan *Pearson's correlation coefficient* dengan rumus berikut :

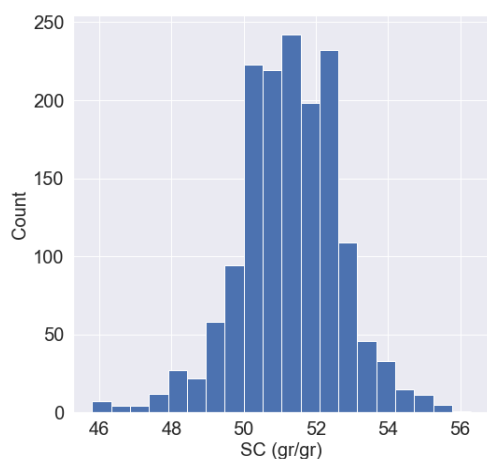
$$r_{xy} = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Dimana : x = variabel pertama, y = variabel kedua dan n = banyaknya pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai SC diperoleh dari data harian yang berada pada interval : 45.8 – 56.3 g/g. Data berasal dari tiga tahun terakhir 01 Januari 2020 – 17 Oktober 2022. Data kondisi operasi yang digunakan berjumlah 1.562 data. Data yang dikumpulkan adalah suhu reaksi, konsentrasi pengikat silang, penambahan gas nitrogen, konsentrasi inisiator, konsentrasi monomer, *retention time*, dan SC.

Histogram persebaran data SC dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan histogram tersebut nilai SC paling banyak berada pada rentang: 50.0–52,5 g/g.

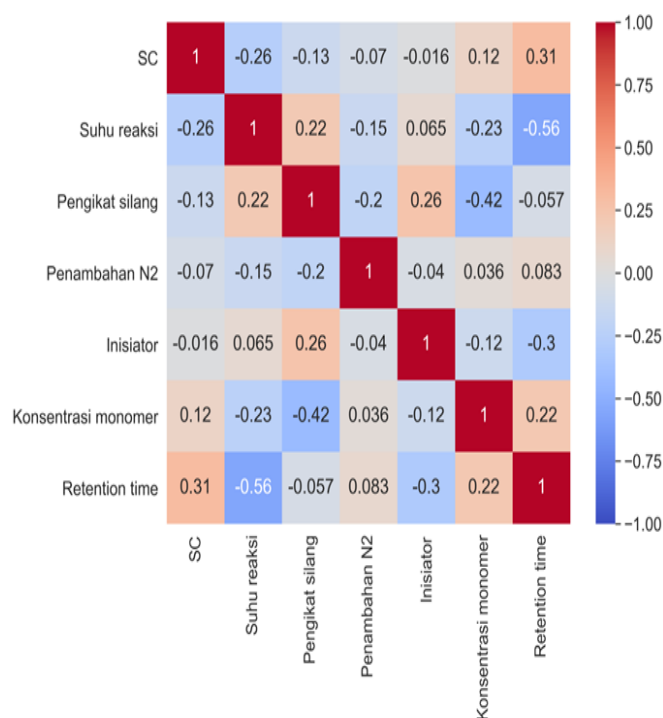


Gambar 4. Sebaran data SC dari 1.562 data entri Korelasi antara variabel-variabel kondisi operasi pada tahapan polimerisasi radikal di reaktor dengan nilai SC dianalisis menggunakan *correlation data analysis*. Variabel bebas (x) adalah: suhu reaksi, konsentrasi pengikat silang,

penambahan gas nitrogen, konsentrasi inisiator, konsentrasi monomer dan *retention time* sedangkan variabel terikat (y) adalah *swelling capacity* (SC).

Berdasarkan hasil analisis korelasi seperti yang terlihat pada Gambar 5 diperoleh variabel yang mempunyai korelasi paling kuat terhadap SC adalah *retention time* dan suhu reaksi dengan nilai koefisien korelasi 0.31 & -0.26. Korelasi paling lemah diperoleh dari penambahan gas nitrogen dan konsentrasi inisiator sebesar -0.07 dan -0.02.

Nilai positif pada gambar menunjukkan hubungan yang berbanding lurus sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik. Nilai positif artinya apabila variabel bebas dinaikkan nilainya maka implikasinya adalah kenaikan nilai SC dan begitu pula sebaliknya apabila diturunkan akan mengakibatkan nilai SC mengalami penurunan. Sebaliknya, nilai negatif artinya apabila variabel bebas dinaikkan nilainya maka akan terjadi penurunan nilai SC begitu pula sebaliknya. Korelasi positif paling kuat adalah *retention time*, sedangkan korelasi negatif paling kuat adalah suhu reaksi. Gambar 5 menunjukkan hasil analisis korelasi variabel-variabel yang didapatkan.



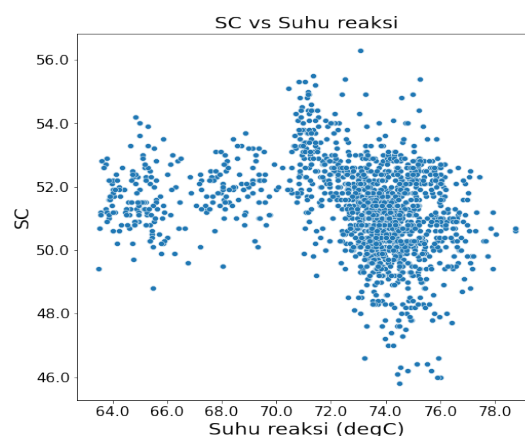
Gambar 5. Hasil analisis correlation matrix & skor Pearson's correlation coefficient

Hubungan Suhu Reaksi dengan SC

Gambar 6 menunjukkan korelasi antara suhu reaksi dengan nilai SC. Berdasarkan gambar, polimerisasi pada suhu rendah 64–70 °C menghasilkan SAP dengan nilai SC diatas 50 g/g. Polimerisasi pada suhu lebih besar dari 70 °C menghasilkan SAP yang memiliki nilai SC bervariasi seperti yang terlihat dari lebarnya rentang nilai SC yang didapat (45–56 g/g).

Suhu reaksi yang dianalisis adalah berada pada interval 63.5°C–78.7°C. Koefisien korelasi antara suhu reaksi dengan SC yang diperoleh adalah -0.26. Ini berarti semakin tinggi suhu reaksi polimerisasi radikal di reaktor maka nilai

SC akan turun. Penurunan nilai SC ini terjadi karena kemungkinan reaksi polimerisasi berjalan dengan waktu yang relatif cepat pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat pada korelasi antara suhu reaksi dengan *retention time* pada reaktor yang juga negatif, koefisien korelasi -0.56.



Gambar 6. Hubungan SC dengan suhu reaksi

Laju reaksi polimerisasi dipengaruhi oleh suhu reaksi berdasarkan nilai konstanta laju reaksi polimerisasi k_p dan k_t (propagasi dan terminasi). Konstanta laju reaksi merupakan fungsi suhu. Suhu yang lebih tinggi akan membuat nilai konstanta laju reaksi menjadi lebih besar dan kemudian mempercepat terjadinya reaksi. Selain itu kemungkinan proses *thermal crosslinking* pada polimerisasi dengan suhu tinggi juga akan membuat SC menjadi turun. *Thermal crosslinking* membuat terlalu banyak ikatan silang yang terbentuk sehingga polimer menjadi terlalu padat dan ruang untuk penyerapan air menjadi lebih kecil (Hosseinzadeh, 2013).

Semakin tinggi suhu polimerisasi maka berat molekul rata-rata dari SAP akan turun. Berdasarkan data dari *europa patent*, berat molekul sebanding dengan nilai SC, sehingga nilai SC ini akan turun juga. (Specification, 2020). Pada suhu tinggi proses terminasi pada polimerisasi radikal kemungkinan akan didominasi oleh reaksi disproporsi.

Disproporsionasi membutuhkan energi yang lebih besar untuk memecah ikatan kimia. Reaksi terminasi disproporsi merupakan perpindahan atom H yang labil dari satu monomer radikal aktif ke monomer radikal lainnya sehingga menghasilkan polimer dengan

ikatan rangkap dan tunggal. Ikatan rangkap pada polimer mengakibatkan kondisi yang kurang stabil dan cenderung reaktif.

Sebaliknya pada suhu reaksi polimerisasi yang lebih rendah, reaksi terminasi kopling yang lebih dominan dengan menghasilkan polimer berikatan tunggal yang stabil.

Secara visual gel polimer yang terbentuk ketika suhu reaksi tinggi adalah melebar sampai menyentuh dinding reaktor karena reaksi terjadi lebih cepat. Selain itu gel yang terbentuk mempunyai gelembung yang lebih besar, gelembung ini akan membuat pori-pori gel polimer terlalu besar sehingga ketika masuk unit *dryer* mengalami penguapan yang lebih tinggi. Serbuk SAP yang dihasilkan dari *dryer* menjadi lebih kering dan ukurannya banyak yang sangat halus (lebih kecil dari 45 mikrometer). Ukuran yang sangat halus membuat SC menjadi relatif kecil. Hasil penelitian skala industri ini didukung oleh hasil penelitian dari brocken, braihi dan Hosseinzadeh (2017) dimana suhu yang tinggi akan menurunkan nilai SC.

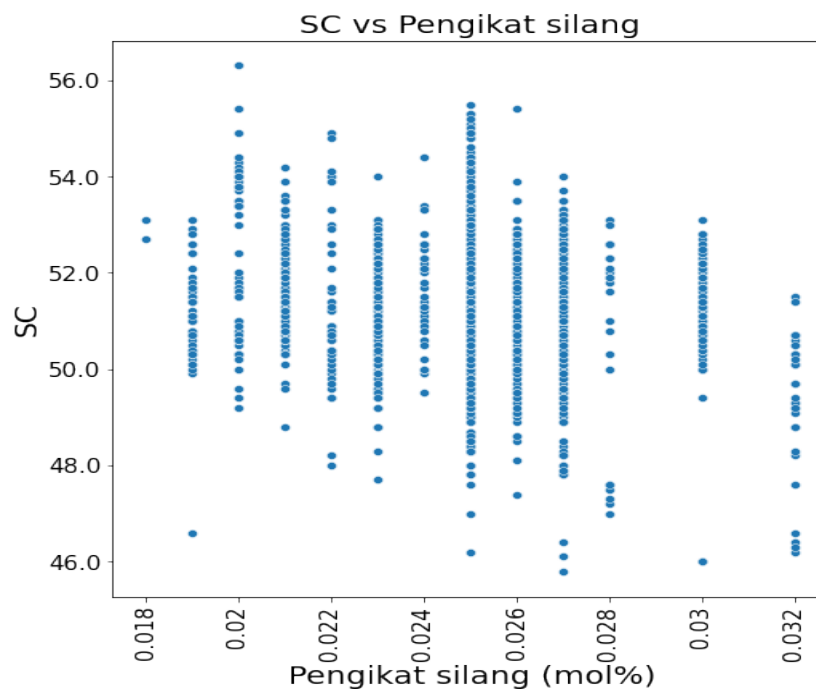
Hubungan konsentrasi pengikat silang dengan SC

Pengikat silang adalah zat kimia yang dapat mengikat secara silang monomer-monomer pada SAP, mencegah

polimer menjadi terlarut dalam air dan membuat SAP mempunyai kemampuan *swelling* (Kwon et al. 2021). Pengikat silang yang dianalisis adalah dengan interval konsentrasi 0.018–0.032 mol%.

Berdasarkan hasil analisis korelasi diperoleh nilai koefisien negatif antara

konsentrasi pengikat silang dengan SC dengan nilai -0.13. Semakin besar jumlah pengikat silang maka semakin rendah nilai SC begitu juga sebaliknya. Gambar 7 menunjukkan korelasi antara konsentrasi pengikat silang dengan nilai SC.



Gambar 7. Hubungan SC dengan pengikat silang

Pengikat silang yang banyak membuat polimer menjadi lebih rapat (Ahmed & Syed. 2016). Semakin rapat densitas polimer oleh ikatan silang maka ruang antar rantai/jaringan untuk molekul air akan berkurang dan pori-pori untuk tempat air masuk yang terbentuk menjadi lebih kecil, sehingga nilai SC dan hidrofilitasnya menjadi turun.

Kerapatan dari ikatan *crosslinking* pada SAP mempengaruhi SC dan mempunyai korelasi yang berbanding terbalik. Kerapatan ruang yang tinggi membuat polimer menjadi kurang elastis, kaku dan molekul air lebih susah untuk masuk (Sunardi et al. 2017). Elastisitas gel sebanding dengan nilai SC, semakin elastis gel maka SC akan semakin tinggi (Susmanto et al. 2020).

Secara visual, pada reaksi polimerisasi radikal SAP dengan jumlah pengikat silang yang lebih banyak akan membuat reaksi menjadi lebih stabil. Keuntungan dari jumlah pengikat silang lebih banyak adalah membuat reaksi lebih stabil di reaktor dan polimer yang terbentuk lebih padat sehingga tidak melebar dan menyentuh dinding reaktor, akan tetapi SC yang dihasilkan relatif akan turun dan biaya konsumsi untuk pengikat silang menjadi naik.

Terlalu sedikit pengikat silang akan menghasilkan polimer yang kurang padat sehingga melebar sampai ke dinding reaktor. Polimer yang melebar ini terkadang menempel dan terakumulasi. Polimer yang menyentuh dinding reaktor akan mengakibatkan akumulasi polimer dalam waktu tertentu dan kemudian akan mengganggu proses polimerisasi pada reaktor dan unit-unit selanjutnya.

Jumlah pengikat silang yang terlalu sedikit membuat penyerapan air oleh SAP akan menjadi rendah karena ikatan silang yang terbentuk tidak optimal sehingga tidak dapat menahan air yang telah diserap. Selain itu polimer SAP menjadi mudah terlarut dalam air.

Konsentrasi pengikat silang juga memiliki korelasi yang berbanding lurus dengan suhu reaksi. Berdasarkan hasil analisis data didapatkan semakin banyak

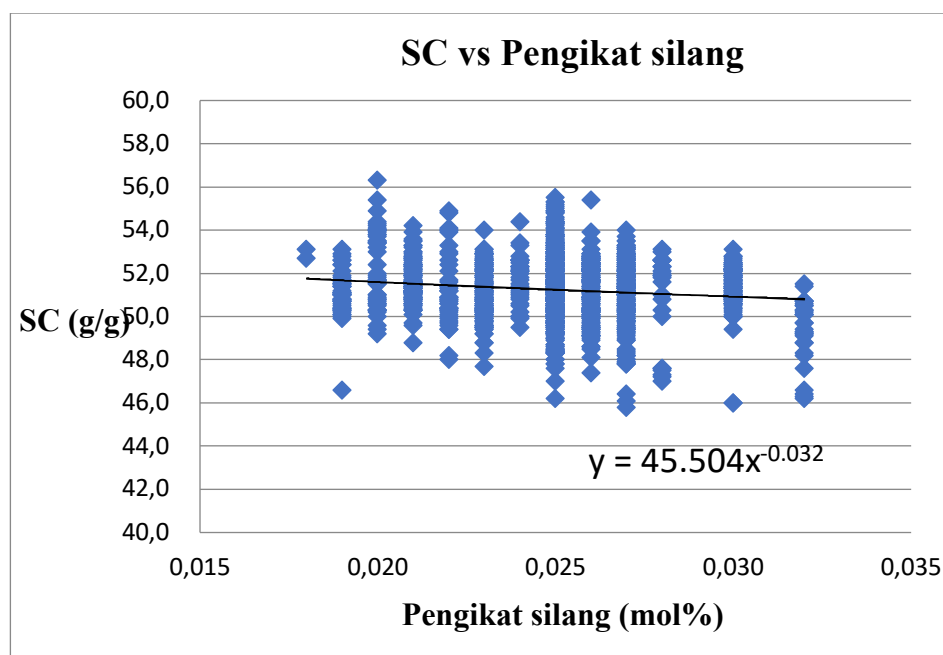
jumlah pengikat silang, suhu reaksi akan relatif meningkat. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisis data dimana korelasi positif 0.22. Peningkatan suhu reaksi berdampak pada penurunan berat molekul rata-rata SAP seperti pembahasan sebelumnya.

Pada analisis korelasi yang dilakukan dalam penelitian ini, hubungan antara konsentrasi pengikat silang dan SC diasumsikan sebagai linier. Llanes et al. 2020 & Hosseinzadeh. 2013 mengemukakan bahwa hubungan hubungan antara konsentrasi pengikat silang adalah tidak linier, tetapi eksponensial seperti di bawah :

$$SC = k.C^{-n}$$

dimana k dan n adalah konstanta sedangkan C adalah konsentrasi atau jumlah pengikat silang. Pada penelitian ini data SC dan konsentrasi pengikat silang dicoba di-*fitting* menggunakan persamaan diatas dan didapatkan kurva seperti terlihat pada Gambar 8.

Fitting data menggunakan persamaan Llanes et al. 2020 sehingga mendapatkan persamaan $y = 45.504x^{-0.032}$, dimana k = 45.504 dan n = 0.032. Pada penelitian Llanes didapat nilai k = 6.14 dan n = 0.67. Perbedaan nilai k dan n ini terjadi karena perbedaan antara data skala lab dengan industri dan juga jenis pengikat silang yang berbeda.



Gambar 8. Kurva hasil fitting dengan persamaan Llanes et al. (2020)

Hubungan penambahan gas nitrogen dengan SC

Rentang dari gas nitrogen yang ditambahkan pada saat polimerisasi adalah 0–1.5 Nm³/jam. Hasil analisis korelasi didapatkan koefisien korelasi sebesar -0.07. Koefisien korelasi ini merupakan kedua terlemah jika dibandingkan dengan koefisien korelasi yang didapatkan dari variabel-variabel yang lain. Kecilnya koefisien korelasi yang didapatkan menunjukkan bahwa penambahan nitrogen kurang atau tidak berkorelasi terhadap besarnya nilai SC yang didapatkan. Kecilnya koefisien korelasi bisa juga disebabkan karena data yang tersedia kurang bervariasi.

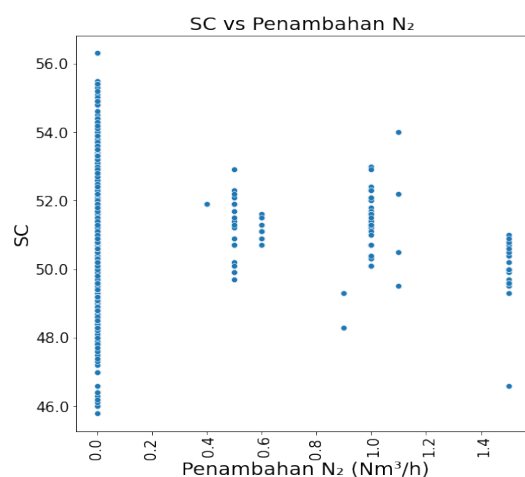
Walaupun koefisien korelasi yang didapat nilainya kecil, *trend* yang

didapatkan menunjukkan bahwa penambahan gas nitrogen membuat nilai SC menurun. Secara fisik diamati bahwa ketika nitrogen ditambahkan saat polimerisasi akan menghasilkan lebih banyak serbuk SAP dengan ukuran sangat halus, lebih kecil dari 45 μ m. SAP dengan ukuran sangat halus ini akan menurunkan nilai SC. Semakin banyak jumlah gas nitrogen yang diinjeksikan akan membuat nilai SC menjadi turun karena jumlah SAP dengan ukuran sangat halus yang dihasilkan akan semakin tinggi.

Ketika dilakukan injeksi nitrogen pada reaktor, terbentuk gelembung pada gel polimer. Gelembung ini berasal dari gas nitrogen dan uap air yang menguap di reaktor. Gelembung-gelembung ini

membuat pori-pori dari polimer lebih banyak sehingga penguapan air lebih banyak di reaktor dan *dryer*.

Kondisi yang lebih kering membuat serbuk berukuran sangat halus menjadi lebih banyak. Gel yang terbentuk setelah penambahan gas nitrogen mempunyai lebih banyak lipatan. Lipatan-lipatan ini adalah cerminan dari gelembung-gelembung yang terbentuk.



Gambar 9. Hubungan SC dengan penambahan N₂

Walaupun analisis korelasi penambahan nitrogen dan nilai SC mendapatkan nilai koefisien korelasi yang kecil, penambahan nitrogen membuat nilai SC yang didapatkan memiliki rentang yang lebih kecil dibanding tanpa penambahan nitrogen seperti terlihat pada Gambar 9. Penambahan gas nitrogen dengan volume rendah membuat SAP yang dihasilkan memiliki nilai SC yang relatif diatas lebih besar dan sama dengan dari 50 g/g

sedangkan penambahan dengan volume nitrogen lebih besar menghasilkan SAP dengan nilai SC relatif lebih kecil dan sama dengan 50 g/g.

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan nitrogen pada saat polimerisasi adalah menguntungkan. Penambahan gas nitrogen membuat polimerisasi menjadi relatif stabil. Gas nitrogen membuat suhu reaksi polimerisasi menjadi lebih turun. Hal ini dibuktikan juga dengan data korelasi antara gas nitrogen dengan suhu reaksi yang mempunyai hubungan negatif -0.15.

Injeksi nitrogen pada monomer mengakibatkan konsentrasi oksigen menjadi turun. Oksigen merupakan inhibitor pada polimerisasi radikal karena keberadaannya akan berkompetisi dengan monomer untuk bereaksi dengan radikal dari inisiator (Yeh et al. 2018). Selain itu oksigen juga berpengaruh terhadap efektivitas dari MEHQ sebagai inhibitor (Mehner. 2021). Oksigen sebagai stabilizer bersifat penghambat polimerisasi. Sebagai inhibitor, Oksigen akan dikonsumsi ketika reaksi polimerisasi (Brand et al. 2011).

Konsentrasi oksigen yang turun akan membuat reaksi polimerisasi radikal menjadi lebih optimal dan lebih cepat. Suhu reaksi dapat menjadi lebih rendah dibandingkan reaksi tanpa nitrogen.

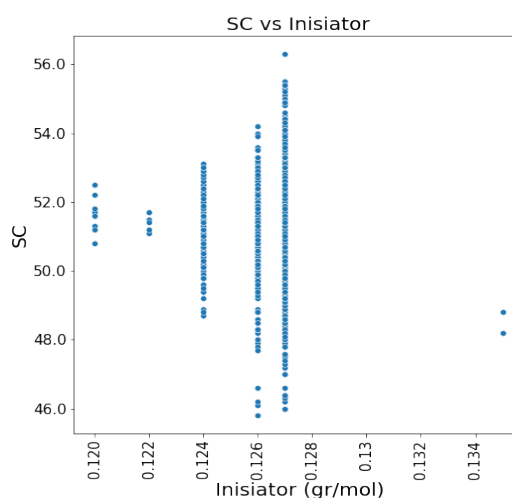
Walaupun menguntungkan, penggunaan gas nitrogen akan meningkatkan biaya produksi karena adanya biaya konsumsi untuk gas nitrogen

Hubungan konsentrasi inisiator dengan SC

Rentang konsentrasi inisiator yang dianalisis adalah 0.120–0.135 g/mol. Koefisien korelasi inisiator dengan SC yang didapatkan adalah -0.02. Koefisien korelasi ini adalah yang terlemah dibandingkan dengan variabel-variabel yang lain karena data yang tersedia kurang bervariasi. Semakin banyak inisiator ditambahkan memiliki kecenderungan mengakibatkan nilai SC yang didapat relatif sedikit lebih kecil.

Walaupun koefisien korelasi yang didapatkan memiliki nilai kecil yang artinya konsentrasi inisiator yang ditambahkan memiliki korelasi yang lemah atau tidak berkorelasi dengan nilai SC, Gambar 10 menunjukkan bahwa konsentrasi inisiator yang ditambahkan sangat mempengaruhi nilai SC yang didapat. Pada konsentrasi inisiator yang rendah (0.120–0.122) g/mol nilai SC yang didapatkan diatas 50 g/g dan memiliki rentang yang tipis. Penambahan inisiator dengan kadar lebih tinggi sampai dengan 0.127 g/mol

mengakibatkan rentang nilai SC yang didapat lebih lebar.



Gambar 10. Hubungan SC dengan inisiator

Jumlah inisiator yang lebih rendah dapat mengendalikan jumlah radikal inisiator sehingga tidak mengganggu proses polimerisasi. Sebaliknya jumlah inisiator yang lebih banyak akan menghasilkan radikal inisiator yang banyak dan biaya konsumsi inisiator yang naik. Hal ini dapat dilihat pada nilai konstanta laju reaksi dekomposisi (kd) yang merupakan fungsi konsentrasi/jumlah inisiator (Ward, 2021).

Radikal inisiator yang terlalu banyak pada tahapan inisiasi dapat membuat reaksi polimerisasi tidak stabil. Reaksi pada tahapan terminasi pada polimerisasi menjadi terganggu ketika radikal inisiator yang terlalu banyak kemudian bereaksi dengan radikal polimer sehingga polimer

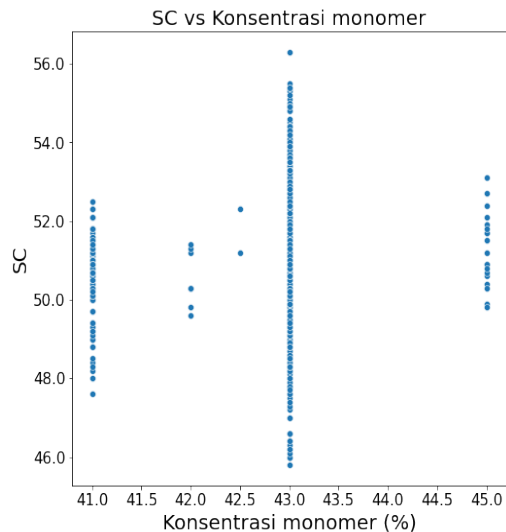
yang terbentuk tidak optimal dan nilai SC menjadi turun. (Hamzah, 2017).

Semakin banyak jumlah inisiator maka reaksi akan semakin cepat terjadi. Hal ini dapat dilihat dari analisis korelasi data antara inisiator dengan *retention time* dimana korelasinya adalah -0.30. Hubungan yang berbanding terbalik ini memperlihatkan kalau inisiator berpengaruh terhadap cepat atau lambatnya reaksi. Reaksi yang berjalan dengan cepat dengan *retention time* kecil maka akan membentuk polimer dengan panjang rantai yang pendek. Polimer yang berantai pendek akan mempunyai nilai *SC* yang lebih rendah.

Fenomena inisiator ini sesuai dengan persamaan panjang rantai kinetik polimer (Abidin et al. 2018). Panjang rantai kinetik polimer berbanding terbalik dengan jumlah inisiator. Polimerisasi radikal SAP terkadang tidak stabil, salah satu faktornya adalah ketika polimer mulai terbentuk terjadi kenaikan viskositas yang drastis sehingga panas reaksi tidak terdistribusi dengan baik dan sulit menyebar. Hal ini bisa dicegah dengan suhu reaksi dan jumlah inisiator yang lebih rendah agar tidak menghasilkan panas reaksi yang terlalu tinggi (Ma & Wen, 2020).

Hubungan konsentrasi monomer dengan SC

Interval konsentrasi monomer pada data yang dianalisis adalah 41.0–45.0 %w/t. Koefisien korelasi antara konsentrasi monomer dengan nilai *SC* didapat positif sebesar 0.12. Semakin tinggi konsentrasi monomer yang ditambahkan mengakibatkan semakin tinggi nilai *SC*. Hal ini terjadi karena jumlah monomer yang banyak berikatan silang akan menghasilkan jumlah gugus hidrofilik yang relatif banyak. Semakin banyak gugus hidrofilik yang ada pada polimer maka semakin banyak air yang mampu diserap oleh polimer (Sunardi et al. 2017).



Gambar 11. Hubungan *SC* dengan konsentrasi monomer

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa konsentrasi monomer yang digunakan mempengaruhi rentang nilai *SC* yang didapat dimana rentang paling lebar

didapatkan ketika konsentrasi monomer yang digunakan sebesar 43.0%. Penurunan konsentrasi monomer menjadi 42.0–42.5 % menyebabkan rentang nilai SC menjadi lebih tipis.

Konsentrasi monomer yang tinggi dapat membuat laju dan derajat polimerisasi tinggi (Ma & Wen. 2020). Derajat polimerisasi adalah jumlah unit monomer pada rantai polimer atau perbandingan antara berat molekul polimer dengan berat molekul unit strukturnya (Saefuloh et al. 2019).

Konsentrasi monomer yang lebih tinggi akan menghasilkan polimer dengan *molecular weight* yang tinggi sehingga nilai SC akan semakin tinggi (Lee et al. 2018) & (Ward. 2021). Selain itu peningkatan konsentrasi monomer akan meningkatkan panjang rantai polimer sehingga jumlah SAP sebagai penyerap yang dihasilkan akan semakin banyak (Susmanto et al. 2020).

Panjang rantai kinetik polimer dipengaruhi oleh konsentrasi monomer pada tahapan propagasi. Propagasi disebut juga tahapan pembentukan rantai aktif dimana monomer radikal aktif bereaksi dengan molekul monomer lain sehingga rantai aktif yang cukup panjang terbentuk (Sulistiyawati, 2010).

Semakin tinggi konsentrasi monomer akan membuat suhu reaksi turun.

Sebaliknya semakin kecil konsentrasi monomer maka suhu reaksi akan lebih tinggi. Berdasarkan data hasil analisis didapat korelasi negatif -0.23. Hal ini terjadi karena konsentrasi monomer yang rendah mempunyai konsentrasi air lebih tinggi sehingga untuk proses polimerisasi membutuhkan suhu yang relatif lebih tinggi untuk menghilangkan air.

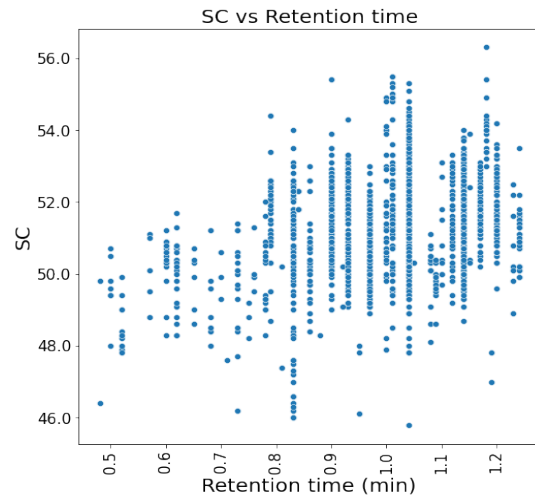
Hubungan antara konsentrasi monomer dengan pengikat silang adalah negatif dimana semakin besar konsentrasi monomer maka jumlah pengikat silang harus lebih sedikit. Sebaliknya apabila konsentrasi monomer lebih rendah maka jumlah pengikat silang sebaiknya lebih banyak. Korelasi kedua variabel ini adalah -0.42. Hal ini memberikan pengaruh terhadap kerapatan dari polimer. Apabila monomer dan pengikat silang sama-sama berjumlah banyak maka polimer yang terbentuk akan menjadi lebih padat sehingga menurunkan nilai SC.

Keuntungan lain dari konsentrasi monomer yang lebih tinggi adalah penghematan energi. Ketika konsentrasi monomer tinggi, jumlah air yang harus dihilangkan dari gel polimer hasil polimerisasi menjadi lebih sedikit. Hal ini membuat beban kerja unit *dryer* setelah reaktor menjadi lebih ringan dimana konsumsi dari *steam* akan menjadi turun.

Semakin rendah konsentrasi monomer maka kondisi polimer lebih basah sehingga beban energi pada *dryer* akan menjadi lebih tinggi. Semakin banyak kandungan air pada polimer maka semakin banyak *steam* yang digunakan untuk menghilangkannya pada unit *dryer*.

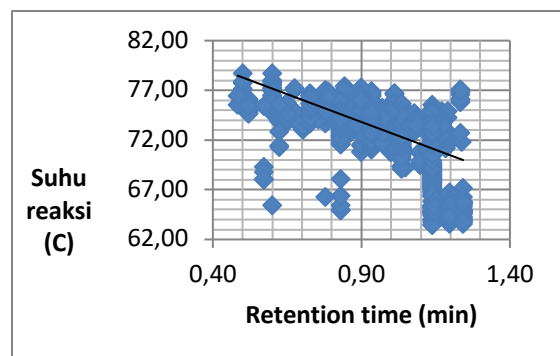
Hubungan retention time dengan SC

Retention time adalah waktu tinggal monomer di sepanjang reaktor ketika mengalami proses polimerisasi atau waktu yang dibutuhkan monomer membentuk gel polimer. Interval *retention time* yang dianalisis adalah 0.48–1.24 menit. Koefisien korelasi antara *retention time* dengan SC dari data adalah 0.31. Semakin lama *retention time* maka nilai SC semakin tinggi. Lama waktu reaksi mempengaruhi rantai polimer yang dihasilkan. Waktu yang lebih lama akan menghasilkan polimer dengan rantai yang lebih panjang sehingga berat molekul akan menjadi lebih tinggi. Reaksi yang berjalan cepat akan menghasilkan polimer dengan rantai yang pendek sehingga ruang untuk mengikat air menjadi relatif kecil dan SC menjadi turun. Sebaliknya rantai polimer yang panjang akan menghasilkan ruang untuk molekul air yang lebih besar sehingga nilai SC menjadi meningkat (Shanmugasundaram. 2008).



Gambar 12. Hubungan SC dengan retention time

Retention time mempunyai korelasi negatif dengan suhu reaksi. Koefisien korelasi antara dua variabel ini adalah -0.56. Semakin tinggi suhu reaksi maka *retention time* pada reaktor akan semakin pendek, sebaliknya semakin rendah suhu reaksi maka *retention time* akan semakin lama. Kurva korelasi ini dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Hubungan suhu reaksi dengan retention time

Berdasarkan Gambar 13 dapat dilihat bahwa suhu reaksi yang tinggi akan membuat polimer SAP akan lebih cepat terbentuk. Sebaliknya suhu reaksi yang

lebih rendah akan membuat monomer lebih lama terbentuk menjadi gel polimer.

KESIMPULAN

Variabel yang mempunyai korelasi paling kuat terhadap nilai SC dari SAP adalah *retention time* dan suhu reaksi pada polimerisasi radikal di reaktor dengan nilai 0.31 dan -0.26. Korelasi paling lemah diperoleh dari penambahan gas nitrogen dan konsentrasi inisiator dengan nilai -0.07 dan -0.02. Korelasi yang positif dari variabel kondisi operasi reaktor terhadap SC

adalah konsentrasi monomer dan *retention time*. Sebaliknya korelasi yang negatif terhadap SC adalah pada suhu reaksi, jumlah pengikat silang, penambahan gas nitrogen dan inisiator.

Hasil dari penelitian diharapkan dapat memberikan referensi terkait korelasi dari variabel-variabel kondisi operasi reaktor terhadap *swelling capacity* SAP. Selain itu juga sebagai referensi terhadap peneliti selanjutnya dan berkontribusi untuk pengembangan studi *machine learning* di dalam penelitian teknik kimia.

DAFTAR RUJUKAN

- Abidin, A. Z., Susanto, G., Sastra, N. M. T., & Puspasari, T. (2018). Sintesis dan Karakterisasi Polimer Superabsorban dari Akrilamida. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 11(2), 84. <https://doi.org/10.5614/jtki.2012.11.2.5>
- Ahmed, R., & Syed, K. A. (2016). Synthesis of Superabsorbent Polymer (SAP) via Industrially Preferred Route. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 12, 383–387.
- Amalia, R., & Kumoro, A. C. (2016). Analisis sifat fisikokimia dan uji korelasi regresi antara nilai derajat substitusi dengan swelling power dan solubility pada tepung gadung (*Dioscorea hispida* Dennst) terasetilasi. *Inovasi Teknik Kimia*, 1(1), 17–26.
- Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). The correlation coefficient: An overview. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36(1), 41–59. <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- Bachra, Y., Grouli, A., Damiri, F., Bennamara, A., & Berrada, M. (2020). A new approach for assessing the absorption of disposable baby diapers and superabsorbent polymers: A comparative study.

- Results in Materials, 8(November).
<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100156>
- Braihi, A. (2016). Applications of the Super Absorbent Polymers. ResearchGate, December 2016, 1–4.
- Brand, R. H., Hartwig, A., Opitz, B., Pfeifer, C., Drochner, A., & Vogel, G. H. (2011). The Consumption of Oxygen and p-Methoxyphenol in Acrylic Acid - Kinetics and Modeling. *Macromolecular Reaction Engineering*, 5(5–6), 212–222. <https://doi.org/10.1002/mren.201000057>
- Brocken, L., Price, P. D., Whittaker, J., & Baxendale, I. R. (2017). Continuous flow synthesis of poly(acrylic acid): Via free radical polymerisation. *Reaction Chemistry and Engineering*, 2(5), 662–668. <https://doi.org/10.1039/c7re00063d>
- Budiman Anwar, Nurkomarasari Risa, S. Y. (2021). *Chemica Isola* Pengaruh Crosslinker N , N ' - Metilenbisakrilamida (MBA) terhadap Kinerja Kopolimer Superabsorben Selulosa Bakterial Nata de Soya - Asam Akrilat yang Disintesis Menggunakan Radiasi Microwave. *Chemica Isola*, 1(April), 1–8. <https://ejournal.upi.edu/index.php/C>
- I/index ARTICLE
- Dave, P. N., & Gor, A. (2018). Natural polysaccharide-based hydrogels and nanomaterials: Recent trends and their applications. In *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00003-1>
- Hamzah, N. (2017). Teknik Sintesis Povidon. *Jf Fik Uinam*, 5(36).
- He, Z., Shen, A., Guo, Y., Lyu, Z., Li, D., Qin, X., Zhao, M., & Wang, Z. (2019). Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. *Construction and Building Materials*, 225, 569–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.139>
- Hosseinzadeh, H. (2013). Synthesis and swelling properties of a poly(vinyl alcohol)-based superabsorbing hydrogel. *Current Chemistry Letters*, 2(3), 153–158. <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2013.05.001>
- Jafari, M., Najafi, G. R., & Sharif, M. A. (2021). Superabsorbent polymer composites derived from polyacrylic acid: Design and synthesis , characterization , and swelling

- capacities. 29(6), 733–739. <https://doi.org/10.1177/0967391120933482>
- Khanlari, S., & Dubé, M. A. (2015). Effect of pH on Poly(acrylic acid) Solution Polymerization. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 52(8), 587–592. <https://doi.org/10.1080/10601325.2015.1050628>
- Konstantinov, I. A., & Broadbelt, L. J. (2019). A Quantum Mechanical Approach for Accurate Rate Parameters of Free-Radical Polymerization Reactions. In *Computational Quantum Chemistry*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815983-5.00002-7>
- Kwon, Y. R., Kim, J. S., & Kim, D. H. (2021). Effective enhancement of water absorbency of itaconic acid based-superabsorbent polymer via tunable surface—crosslinking. *Polymers*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/polym13162782>
- Lee, G. H., Vo, N. D., Jeon, R. Y., Han, S. W., Hong, S. U., & Oh, M. (2018). Modeling and simulation for acrylamide polymerization of super absorbent polymer. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 35(9), 1791–1799. <https://doi.org/10.1007/s11814-018-0093-x>
- Llanes, L., Dubessay, P., Pierre, G., Delattre, C., & Michaud, P. (2020). Biosourced Polysaccharide-Based Superabsorbents. 51–79.
- Ma, X., & Wen, G. (2020). Development history and synthesis of super-absorbent polymers: a review. *Journal of Polymer Research*, 27(6). <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02097-2>
- Mehner, P. J. (2021). Modeling and Simulation of Components and Circuits with Intrinsically Active Polymers. October. <https://doi.org/10.25368/2021.1>
- Meshram, I., Kanade, V., Nandanwar, N., & Ingle, P. (2020). Super-Absorbent Polymer: A Review on the Characteristics and Application. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, 7(5), 8–21. <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0705002>
- Mohana Raju, K., Padmanabha Raju, M., & Murali Mohan, Y. (2002). Synthesis and water absorbency of crosslinked superabsorbent polymers. *Journal of Applied Polymer Science*,

- 85(8), 1795–1801.
<https://doi.org/10.1002/app.10731>
- Ostrand, M. S., DeSutter, T. M., Daigh, A. L. M., Limb, R. F., & Steele, D. D. (2020). Superabsorbent polymer characteristics, properties, and applications. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 3(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1002/agg2.20074>
- Rakhmawati, I., & Kurniawan, C. (2019). Indonesian Journal of Chemical Science Pengaruh Konsentrasi Metilenbisakrilamida dalam Sintesis Komposit Poli (Asam Akrilat) - Kaolin dan Pengujiannya sebagai Superabsorben. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 8(2), 93–104.
- Saefuloh, I., Rifa'i, A., Haryadi, H., Yusuf, Y., Susilo, S., & Aswata, A. (2019). Pengaruh Temperatur dan Reduksi Hasil Proses Rolling Terhadap Sifat Mekanik Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Sebagai Material Pengganti Lutut Tiruan. *FLYWHEEL : Jurnal Teknik Mesin Untirta*, V(1), 105.
<https://doi.org/10.36055/fw1.v0i0.5842>
- Shanmugasundaram, O. L. (2008). Superabsorbent polymers. *Asian Dyer*, 5(4), 55–58.
- Specification, E. P. (2020). * EP002980124B1 *. 1(19), 1–15.
- Sulistiyawati, E. (2010). Polimerisasi Akrilamida dengan Metode Mixed Solvent Precipitation Menggunakan Inisiator Kalium Persulfat. *Eksergi*, X, 21.
- Sunardi, S., Irwan, A., Latifah, A., Istikowati, W. T., & Haris, A. (2017). Kajian Pengaruh Jumlah Agen Pengikat Silang Terhadap Karakteristik Superabsorben Asam Akrilat Tercangkok Selulosa Dari Alang-Alang (*Imperata cylindrica*). *Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*, 11(1), 15.
<https://doi.org/10.20527/jstk.v11i1.3169>
- Sunit, H. (2010). Perkembangan Teknologi Polimerisasi Radikal Bebas Terkontrol dan Aplikasi pada Pembuatan Biodegradabel Polimer. In *Prosiding Simposium Nasional Polimer VI*.
- Susmanto, P., Santia, L., Utari, I. R., & Rendana, M. (2020). Pengaruh Penambahan Selulosa dari Serat Kapuk dan Crosslink Agent terhadap Sifat Absorpsi dan Rasio Swelling Biopolimer Superabsorben. *Jurnal Integrasi Proses*, 9(2), 9–14.
- Swantom, D., Megasari, K., & Saptajati, R. (2008). Pembuatan Komposit

- Polimer Superabsorben Dengan Mesin Berkas Elektron. *Jurnal Forum Nuklir*, 2(2), 143. <https://doi.org/10.17146/jfn.2008.2.2.3286>
- Ward, J. D. (2021). Feasibility of Free Radical Polymerization of Acrylic Acid in a Continuous Flow Reactor. University of Pittsburgh.
- Windarto, Y. E. (2020). Analisis Penyakit Kardiovaskular Menggunakan Metode Korelasi Pearson, Spearman Dan Kendall. *Jurnal SAINTEKOM*, 10(2), 119. <https://doi.org/10.33020/saintekom.v10i2.149>
- Yeh, C. J., Hu, M., & Shull, K. R. (2018). Oxygen Inhibition of Radical Polymerizations Investigated with the Rheometric Quartz Crystal Microbalance. *Macromolecules*, 51(15), 5511–5518. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00720>
- Zohuriaan Mohammad J., Mehr, and K. K. (2008). Superabsorbent Polymer Materials: A Review. *Iranian Polymer Journal*, 17, 451–477.