



Analisis Kualitatif dan Kuantitatif Co-monomer pada Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) Menggunakan FTIR: Evaluasi Model Regresi dan Implikasi Industri

Naila Agitia Ghaisani^{1*}, Indah Kurniasari²

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Email: nailaagitaaagitaa@gmail.com, kurnia121212inzz@gmail.com

*Penulis korespondensi: nailaagitaaagitaa@gmail.com

Abstract. Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) is a polymer produced through the copolymerization of ethylene with α -olefins such as 1-butene, 1-hexene, and 1-octene. The type and content of co-monomers incorporated into the polymer chain affect the microstructure, crystallinity, density, and mechanical properties of the material, making accurate characterization essential. This study aimed to qualitatively and quantitatively analyze the co-monomer content in LLDPE products using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) at the Tech Center of PT Lotte Chemical Titan Nusantara. Qualitative analysis was performed based on infrared spectral characteristics to distinguish co-monomer types, while quantitative analysis was conducted by developing linear regression models using the absorbance of the diagnostic band at 771 cm^{-1} (A771) and the absorbance ratio A771/A1462 against co-monomer content determined by the reference method of ^{13}C -NMR. The results showed that the absorption band in the $900\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ region, particularly at 771 cm^{-1} , was sensitive to variations in short-chain branching resulting from butene incorporation. The developed regression models demonstrated a linear relationship between FTIR parameters and co-monomer content, enabling rapid and efficient prediction of co-monomer concentration. The absorbance ratio approach provided better stability against variations in sample thickness and spectral baseline fluctuations compared to the direct absorbance method. Therefore, FTIR can be utilized as an effective supporting method for routine analysis of co-monomer content in LLDPE products and can support quality control, product specification validation, and trade classification based on co-monomer content.

Keywords: Co-monomer; FTIR; Linear Regression; LLDPE; Short-Chain Branching.

Abstrak. Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) merupakan polimer yang diproduksi melalui kopolimerisasi etilena dengan α -olefin seperti 1-butene, 1-hexene, dan 1-octene. Jenis dan kadar co-monomer yang terinkorporasi dalam rantai polimer memengaruhi struktur mikro, kristalinitas, densitas, serta sifat mekanik material sehingga perlu dilakukan karakterisasi secara akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kualitatif dan kuantitatif kandungan co-monomer pada produk LLDPE menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) di Tech Center PT Lotte Chemical Titan Nusantara. Analisis kualitatif dilakukan berdasarkan karakteristik spektrum inframerah untuk membedakan jenis co-monomer, sedangkan analisis kuantitatif dilakukan dengan membangun model regresi linear menggunakan absorbansi pita diagnostik pada bilangan gelombang 771 cm^{-1} (A771) dan rasio absorbansi A771/A1462 terhadap kadar co-monomer yang diperoleh dari metode referensi ^{13}C -NMR. Hasil analisis menunjukkan bahwa pita serapan pada wilayah $900\text{--}700\text{ cm}^{-1}$, khususnya pada 771 cm^{-1} , sensitif terhadap variasi short chain branching yang berasal dari inkorporasi co-monomer butene. Model regresi yang dibangun menunjukkan hubungan linear antara parameter FTIR dan kandungan co-monomer sehingga dapat digunakan untuk prediksi kadar co-monomer secara cepat dan efisien. Pendekatan rasio absorbansi memberikan stabilitas yang lebih baik terhadap variasi ketebalan sampel dan fluktuasi baseline spektrum dibandingkan metode absorbansi langsung. Dengan demikian, FTIR dapat digunakan sebagai metode pendukung yang efektif untuk analisis rutin kandungan co-monomer pada produk LLDPE serta mendukung pengendalian mutu, validasi spesifikasi produk, dan klasifikasi perdagangan berdasarkan kandungan co-monomer.

Kata kunci: FTIR; Ko-monomer; LLDPE; Percabangan Rantai Pendek; Regresi Linier.

1. PENDAHULUAN

Polyethylene (PE) merupakan salah satu polimer termoplastik yang paling banyak digunakan di dunia karena memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik, ketahanan kimia yang tinggi, serta biaya produksi yang relatif rendah. Material ini banyak dimanfaatkan pada industri kemasan, konstruksi, otomotif, dan berbagai produk rumah tangga. Perkembangan teknologi

katalis dan proses polimerisasi memungkinkan produksi berbagai jenis polyethylene dengan karakteristik yang berbeda, sehingga sifat produk dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Hubungan antara struktur molekul dan sifat fisik polimer menjadi faktor utama yang menentukan performa material selama penggunaan (Mark, 2020).

Salah satu jenis polyethylene yang memiliki peranan penting dalam industri kemasan fleksibel adalah *Linear Low Density Polyethylene* (LLDPE). Material ini diproduksi melalui kopolimerisasi etilena dengan α -olefin seperti 1-butene, 1-hexene, dan 1-octene sehingga menghasilkan percabangan rantai pendek (short-chain branching/SCB) pada struktur polimer. Keberadaan SCB diketahui memengaruhi densitas, kristalinitas, kekuatan tarik, ketahanan sobek, transparansi film, serta ketahanan terhadap environmental stress cracking. Oleh karena itu, jenis dan kadar co-monomer yang terinkorporasi ke dalam rantai polimer menjadi parameter penting dalam menentukan kualitas dan spesifikasi produk LLDPE (Göpperl et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Karakteristik LLDPE sangat dipengaruhi oleh distribusi dan jumlah short-chain branching yang terbentuk selama proses polimerisasi. Peningkatan kandungan co-monomer menyebabkan bertambahnya gangguan sterik pada rantai polimer sehingga mengurangi kemampuan molekul untuk membentuk struktur kristalin yang teratur. Kondisi tersebut mengakibatkan penurunan kristalinitas dan densitas, namun meningkatkan fleksibilitas serta kemampuan deformasi material. Selain jumlah cabang, bentuk dan panjang cabang yang berasal dari jenis co-monomer yang berbeda juga memberikan pengaruh yang berbeda terhadap sifat termal dan mekanik produk akhir. Oleh sebab itu, analisis kandungan co-monomer menjadi bagian penting dalam pengendalian mutu dan pengembangan grade LLDPE di industri poliolefin (Göpperl et al., 2023).

Penentuan kandungan co-monomer pada LLDPE secara konvensional banyak dilakukan menggunakan Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance (^{13}C -NMR) karena mampu memberikan informasi struktur mikro polimer secara rinci dan akurat. Meskipun demikian, metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain biaya analisis yang relatif tinggi, waktu pengujian yang lebih lama, serta kebutuhan instrumen khusus yang tidak selalu tersedia untuk pengujian rutin dalam skala industri. Seiring meningkatnya kebutuhan analisis yang cepat dan efisien, diperlukan metode alternatif yang mampu memberikan informasi kandungan co-monomer dengan tingkat akurasi yang memadai serta waktu analisis yang lebih singkat (Göpperl et al., 2023).

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan salah satu teknik karakterisasi yang banyak digunakan dalam analisis material polimer karena memiliki keunggulan berupa preparasi sampel yang sederhana, waktu analisis yang cepat, serta kemampuan untuk mengidentifikasi perubahan struktur molekul berdasarkan karakteristik pita serapan inframerah. Pada material polyethylene, beberapa pita serapan diketahui berkaitan dengan keberadaan gugus metil dan struktur percabangan rantai sehingga berpotensi digunakan untuk mengestimasi kandungan co-monomer secara kuantitatif. Pengembangan model korelasi antara parameter spektrum FTIR dan data referensi seperti ^{13}C -NMR menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk mendukung kegiatan quality control di industri polimer karena lebih praktis dan ekonomis dibandingkan metode konvensional (Göpperl et al., 2023; Mark, 2020).

Berdasarkan uraian tersebut, masih diperlukan metode analisis yang cepat, efisien, dan mampu digunakan secara rutin untuk menentukan kandungan co-monomer pada produk LLDPE. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kandungan co-monomer pada produk LLDPE menggunakan metode Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) di Tech Center PT Lotte Chemical Titan Nusantara. Analisis dilakukan secara kualitatif melalui identifikasi karakteristik spektrum inframerah dan secara kuantitatif melalui pengembangan model regresi linear menggunakan parameter absorbansi yang berkaitan dengan short-chain branching. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan metode alternatif yang efektif untuk mendukung pengendalian mutu, validasi spesifikasi produk, dan klasifikasi produk polyethylene berdasarkan kandungan co-monomernya.

2. METODE

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi hot press machine, brass shim, metal plate, aluminium foil, gunting, mikrometer sekrup, dan instrumen Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) yang tersedia di Tech Center PT Lotte Chemical Titan Nusantara.

Bahan yang digunakan berupa sampel produk Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) dalam bentuk pelet yang selanjutnya dipreparasi menjadi film tipis (plaque film) untuk analisis FTIR.

Prosedur

Preparasi Sampel

Sampel LLDPE dalam bentuk pelet terlebih dahulu dipreparasi menjadi film tipis menggunakan metode hot press. Sejumlah pelet ditempatkan di antara metal plate yang dilapisi aluminium foil dan diatur ketebalannya menggunakan brass shim. Sampel kemudian dipanaskan dan dipres hingga terbentuk film yang homogen. Film yang dihasilkan dipotong

sesuai ukuran pengujian dan ketebalannya diukur menggunakan mikrometer sekrup untuk memastikan keseragaman sampel sebelum dilakukan analisis FTIR. Tahap preparasi ini bertujuan untuk memperoleh sampel dengan ketebalan yang seragam sehingga variasi absorbansi yang dihasilkan lebih merepresentasikan perbedaan komposisi kimia dibandingkan pengaruh fisik sampel.

Analisis Spektrum FTIR

Film LLDPE yang telah dipreparasi dianalisis menggunakan instrumen FTIR untuk memperoleh spektrum inframerah pada rentang bilangan gelombang yang relevan. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik struktur polyethylene melalui pita serapan khas gugus CH_2 serta mengamati perubahan pada wilayah fingerprint yang berkaitan dengan keberadaan co-monomer. Tahap analisis kualitatif dilakukan dengan membandingkan pola spektrum antar sampel dan mengidentifikasi pita diagnostik yang berkaitan dengan short-chain branching (SCB). Perhatian khusus diberikan pada pita serapan sekitar 771 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi rocking CH_2 dan diketahui sensitif terhadap keberadaan co-monomer butene dalam struktur LLDPE.

Analisis Kuantitatif Co-Monomer

Analisis kuantitatif dilakukan menggunakan dua pendekatan. Pendekatan pertama adalah metode tanpa rasio, yaitu dengan menghubungkan nilai absorbansi pada pita diagnostik 771 cm^{-1} (A_{771}) terhadap kandungan co-monomer butene yang diperoleh dari data referensi. Pendekatan kedua menggunakan metode rasio absorbansi, yaitu perbandingan antara absorbansi pada 771 cm^{-1} dan absorbansi pita referensi internal pada 1462 cm^{-1} (A_{771}/A_{1462}). Pita 1462 cm^{-1} dipilih sebagai referensi karena merupakan vibrasi scissoring gugus CH_2 yang merepresentasikan backbone polyethylene dan relatif stabil terhadap perubahan struktur cabang. Penggunaan rasio absorbansi bertujuan untuk meminimalkan pengaruh variasi ketebalan film dan fluktuasi baseline spektrum sehingga menghasilkan model yang lebih stabil.

Pengolahan dan Analisis Data

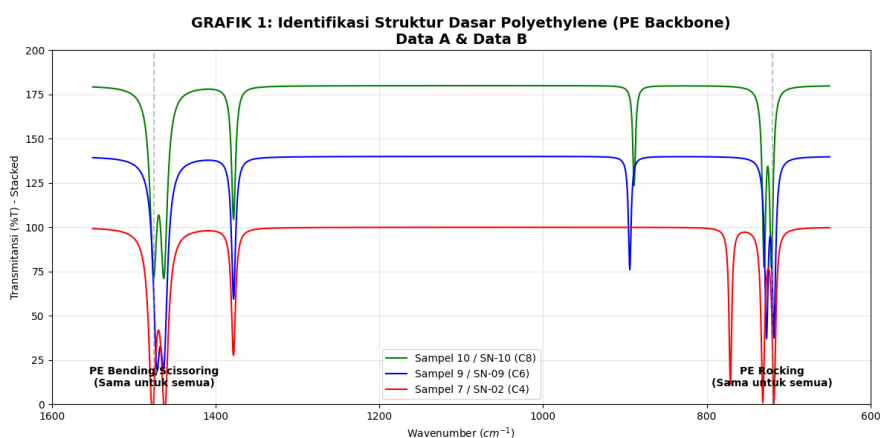
Data absorbansi yang diperoleh dari spektrum FTIR digunakan untuk membangun model regresi linear antara parameter spektral sebagai variabel independen dan kandungan co-monomer sebagai variabel dependen. Evaluasi model dilakukan berdasarkan hubungan linear yang terbentuk serta nilai koefisien determinasi (R^2). Analisis dilakukan baik pada model berbasis absorbansi langsung maupun rasio absorbansi. Selanjutnya dilakukan evaluasi domain model melalui pendekatan interpolasi dan ekstrapolasi untuk mengetahui kemampuan model dalam memprediksi kandungan co-monomer pada sampel di dalam maupun di luar rentang kalibrasi. Nilai kandungan co-monomer yang diperoleh dari analisis ^{13}C -NMR digunakan sebagai nilai referensi (true value) dalam proses kalibrasi dan validasi model FTIR. Dengan

demikian, FTIR digunakan sebagai metode screening yang cepat untuk analisis rutin, sedangkan ^{13}C -NMR berperan sebagai metode referensi untuk memastikan akurasi hasil kuantifikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kualitatif Kandungan Co-Monomer pada Produk LLDPE Menggunakan FTIR

Analisis kualitatif dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik struktur mikro produk *Linear Low Density Polyethylene* (LLDPE) berdasarkan spektrum Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Tahapan ini bertujuan untuk menentukan pita serapan yang dapat digunakan sebagai indikator keberadaan co-monomer serta memahami hubungan antara struktur percabangan rantai polimer dengan karakteristik spektrum inframerah yang dihasilkan. Analisis kualitatif menjadi tahapan yang sangat penting karena seluruh model kuantitatif yang dikembangkan dalam penelitian ini dibangun berdasarkan hasil identifikasi pita diagnostik yang diperoleh dari tahap ini.

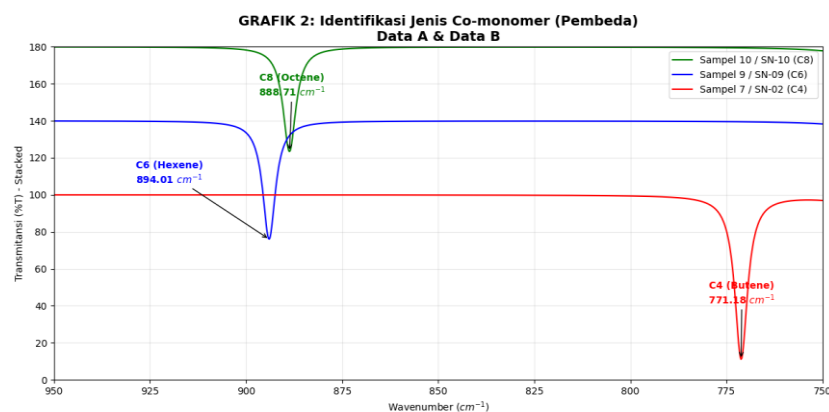


Gambar 1. Identifikasi Struktur Dasar Polyethylene (PE Backbone) Data A & Data B. Spektrum FTIR menunjukkan pita karakteristik polyethylene yang digunakan sebagai dasar identifikasi struktur material dan penentuan daerah spektrum yang sensitif terhadap keberadaan co-monomer.

Berdasarkan spektrum FTIR yang diperoleh, seluruh sampel menunjukkan pita serapan khas polyethylene pada bilangan gelombang sekitar 2915 cm^{-1} dan 2848 cm^{-1} yang berasal dari vibrasi stretching asimetris dan simetris gugus metilena (CH_2). Selain itu, pita serapan pada sekitar 1462 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi scissoring CH_2 juga teramati dengan intensitas yang relatif seragam pada seluruh sampel. Kemunculan pita-pita tersebut menunjukkan bahwa seluruh material yang dianalisis memiliki backbone polyethylene yang sama sehingga perbedaan karakteristik yang diamati pada daerah spektrum lainnya lebih berkaitan dengan variasi struktur percabangan dibandingkan perubahan struktur utama polimer.

Keseragaman pita backbone polyethylene menunjukkan bahwa perbedaan sifat antar sampel tidak disebabkan oleh perubahan jenis polimer dasar, melainkan oleh perbedaan struktur mikro yang terbentuk selama proses kopolimerisasi. Pada LLDPE, struktur mikro sangat dipengaruhi oleh jenis dan jumlah α -olefin yang digunakan sebagai co-monomer. Inkorporasi co-monomer ke dalam rantai polyethylene menghasilkan short-chain branching (SCB) yang dapat mengubah keteraturan rantai polimer, derajat kristalinitas, serta karakteristik vibrasi molekul yang terdeteksi oleh FTIR.

Perbedaan karakteristik spektrum mulai terlihat secara lebih jelas pada wilayah fingerprint yang berada pada rentang bilangan gelombang sekitar $900\text{--}700\text{ cm}^{-1}$. Daerah ini diketahui sangat sensitif terhadap perubahan struktur mikro polimer karena berbagai vibrasi yang berkaitan dengan susunan rantai dan percabangan muncul pada rentang tersebut. Oleh karena itu, identifikasi co-monomer pada penelitian ini difokuskan pada wilayah fingerprint sebagai daerah diagnostik utama.



Gambar 2. Identifikasi Jenis Co-monomer (Pembeda) Data A & Data B

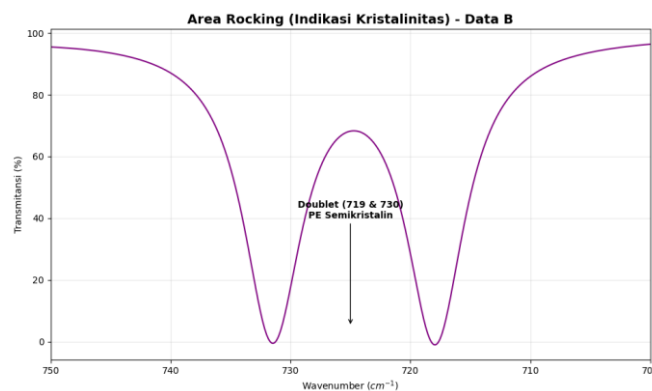
Perbedaan posisi dan intensitas pita serapan pada wilayah fingerprint menunjukkan pengaruh jenis co-monomer terhadap struktur mikro LLDPE.

Hasil analisis menunjukkan bahwa masing-masing jenis co-monomer menghasilkan karakteristik pita serapan yang berbeda pada wilayah fingerprint. Sampel yang mengandung co-monomer butene menunjukkan pita diagnostik utama pada sekitar 771 cm^{-1} , sedangkan sampel yang mengandung hexene dan octene menunjukkan karakteristik pita pada daerah sekitar 894 cm^{-1} dan 888 cm^{-1} . Perbedaan posisi pita tersebut menunjukkan bahwa perubahan panjang cabang yang dihasilkan oleh masing-masing co-monomer memengaruhi lingkungan vibrasi molekul secara berbeda sehingga menghasilkan respons spektral yang berbeda pula.

Kemunculan pita pada daerah tersebut menunjukkan bahwa FTIR mampu digunakan untuk membedakan jenis co-monomer secara kualitatif. Meskipun ketiga sampel memiliki backbone polyethylene yang sama, keberadaan percabangan rantai dengan panjang yang

berbeda menyebabkan perubahan distribusi energi vibrasi pada struktur polimer. Oleh karena itu, perbedaan posisi pita diagnostik dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mengidentifikasi jenis co-monomer yang digunakan dalam proses produksi LLDPE.

Selain digunakan untuk membedakan jenis co-monomer, wilayah fingerprint juga memberikan informasi mengenai perubahan struktur akibat pembentukan short-chain branching. Pada struktur polyethylene linear, rantai polimer dapat tersusun secara relatif teratur sehingga menghasilkan daerah kristalin yang cukup tinggi. Namun, ketika co-monomer terinkorporasi ke dalam rantai utama polimer, terbentuk percabangan pendek yang mengganggu keteraturan susunan rantai tersebut. Gangguan terhadap keteraturan rantai menyebabkan perubahan karakteristik vibrasi yang kemudian tercermin pada spektrum FTIR.



Gambar 3. Area Rocking (Indikasi Kristalinitas)

Daerah rocking vibration menunjukkan perubahan karakteristik serapan yang berkaitan dengan tingkat keteraturan rantai dan keberadaan short-chain branching pada struktur LLDPE.

Daerah rocking vibration merupakan salah satu wilayah spektrum yang paling penting dalam penelitian ini karena berkaitan langsung dengan susunan rantai polyethylene. Vibrasi rocking terjadi akibat gerakan simultan gugus metilena (CH_2) dalam rantai polimer dan sangat dipengaruhi oleh lingkungan struktur di sekitarnya. Perubahan jumlah maupun panjang cabang yang terbentuk akibat inkorporasi co-monomer dapat mengubah pola vibrasi tersebut sehingga menghasilkan perubahan intensitas maupun posisi pita serapan.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perbedaan jenis co-monomer memengaruhi karakteristik rocking vibration yang terbentuk. Co-monomer dengan rantai cabang yang lebih panjang menghasilkan gangguan yang lebih besar terhadap keteraturan rantai polyethylene sehingga menyebabkan perubahan yang lebih signifikan pada wilayah rocking. Fenomena ini menunjukkan bahwa karakteristik spektrum pada daerah rocking tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan co-monomer, tetapi juga oleh panjang cabang yang dihasilkan oleh co-monomer tersebut.

Perubahan pada daerah rocking vibration juga berkaitan erat dengan perubahan derajat kristalinitas material. Pada sampel dengan kandungan short-chain branching yang lebih rendah, rantai polimer masih dapat tersusun secara relatif teratur sehingga pembentukan fase kristalin masih berlangsung dengan baik. Sebaliknya, peningkatan jumlah maupun panjang percabangan menyebabkan efisiensi packing rantai menurun sehingga sebagian rantai tetap berada pada fase amorf. Akibatnya, intensitas dan karakteristik pita pada daerah rocking mengalami perubahan yang mencerminkan perubahan struktur internal material.

Temuan ini menunjukkan bahwa FTIR tidak hanya mampu digunakan untuk mengidentifikasi jenis co-monomer, tetapi juga memberikan informasi mengenai perubahan struktur mikro yang dihasilkan oleh keberadaan co-monomer tersebut. Oleh karena itu, analisis kualitatif FTIR pada penelitian ini berfungsi sebagai dasar untuk memahami hubungan antara struktur percabangan dan respons spektral yang dihasilkan oleh material LLDPE.

Salah satu temuan penting dari analisis kualitatif adalah bahwa pita diagnostik pada sekitar 771 cm^{-1} menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap keberadaan co-monomer butene. Pita tersebut berasal dari vibrasi rocking gugus CH_2 yang dipengaruhi oleh perubahan struktur akibat pembentukan short-chain branching. Perubahan intensitas yang terjadi pada pita ini menunjukkan adanya hubungan antara respons spektral dan kandungan co-monomer dalam material.

Pada tahap awal, pita 771 cm^{-1} digunakan sebagai parameter identifikasi kualitatif untuk membedakan sampel yang mengandung butene dengan sampel yang mengandung co-monomer lain. Namun, hasil pengamatan menunjukkan bahwa perubahan intensitas pita tersebut terjadi secara sistematis terhadap perubahan kandungan co-monomer. Kondisi ini menunjukkan bahwa pita diagnostik tersebut tidak hanya berfungsi sebagai indikator keberadaan co-monomer, tetapi juga berpotensi digunakan sebagai parameter kuantitatif.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Kandungan Co-Monomer Sampel Butene Kualitatif Menggunakan Persamaan Regresi Linear pada *First Trial* dan *Second Trial*

<i>first trial</i> $y = 0.028x + 0.5852$	<i>Sampel Name</i>	<i>%butene (mass balance)</i>	<i>Deviasi</i>
	SN-07 (<i>First Trial</i>)	12,3	0,8 %
	SN-07B (<i>Second Trial</i>)	11,2	
	SN-08 (<i>First Trial</i>)	9,1	1,3 %
	SN-08B (<i>Second Trial</i>)	10,9	

<i>second trial</i> $y = 0.0282x + 0.5841$	SN-07 (<i>First Trial</i>)	12,3	0,8 %
	SN-07B (<i>Second Trial</i>)	11,2	
	SN-08 (<i>First Trial</i>)	9,1	1,2 %
	SN-08B (<i>Second Trial</i>)	10,8	

Tabel menunjukkan hubungan antara jenis co-monomer dan pita diagnostik yang digunakan dalam identifikasi kualitatif.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kandungan *Co-Monomer* Sampel *Butene* Kualitatif Menggunakan Persamaan Regresi Linear pada *First Trial* dan *Second Trial*

<i>first trial</i> $y = 0.0057x + 0.1491$	<i>Sampel Name</i>	<i>%butene (mass balance)</i>	<i>Deviasi</i>
	SN-07 (<i>First Trial</i>)	13,8 %	1,1 %
	SN-07B (<i>Second Trial</i>)	12,3 %	
	SN-08 (<i>First Trial</i>)	11,8 %	0,5%
<i>second trial</i> $y = 0.0056x + 0.1545$	SN-08B (<i>Second Trial</i>)	12,5 %	
	SN-07 (<i>First Trial</i>)	13,1 %	1,1 %
	SN-07B (<i>Second Trial</i>)	11,5 %	
	SN-08 (<i>First Trial</i>)	11,1 %	0,4%
	SN-08B (<i>Second Trial</i>)	11,7 %	

Tabel menunjukkan nilai absorbansi yang diekstraksi dari pita diagnostik 771 cm^{-1} dan digunakan sebagai dasar pembangunan model kuantitatif.

Nilai absorbansi pada pita 771 cm^{-1} kemudian diekstraksi dari spektrum FTIR dan diubah menjadi data numerik. Transformasi ini merupakan tahap penting yang menghubungkan analisis kualitatif dengan analisis kuantitatif. Jika pada analisis kualitatif pita 771 cm^{-1} hanya digunakan untuk menunjukkan keberadaan dan karakteristik co-monomer butene, maka pada tahap selanjutnya nilai absorbansi pita tersebut digunakan sebagai parameter yang dapat dikorelasikan dengan kandungan co-monomer referensi.

Dengan demikian, analisis kualitatif dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai tahap identifikasi struktur, tetapi juga menjadi dasar ilmiah dalam pemilihan parameter kuantitatif yang digunakan untuk membangun model prediksi kandungan co-monomer. Keberhasilan identifikasi pita diagnostik pada daerah 771 cm^{-1} menjadi fondasi utama dalam pengembangan metode FTIR untuk analisis kandungan co-monomer pada produk LLDPE.

Analisis Kuantitatif Kandungan Co-Monomer pada Produk LLDPE Menggunakan FTIR

Analisis kuantitatif dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan spektroskopi FTIR dalam memperkirakan kandungan co-monomer butene pada produk Linear Low Density Polyethylene (LLDPE). Pengembangan metode kuantitatif ini didasarkan pada hasil analisis kualitatif yang menunjukkan bahwa pita serapan pada sekitar 771 cm^{-1} merupakan daerah spektrum yang paling sensitif terhadap keberadaan co-monomer butene. Peak tersebut berasal dari vibrasi rocking gugus metilena (CH_2) yang dipengaruhi oleh pembentukan short-chain branching (SCB) pada struktur polyethylene. Oleh karena itu, perubahan absorbansi pada peak 771 cm^{-1} digunakan sebagai parameter utama dalam pembangunan model prediksi kandungan co-monomer.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Ketebalan Sampel LLDPE

Sampel	First Trial/A (mm)	Second Trial/B (mm)	Rata-Rata A (mm)	Rata-Rata B (mm)	UL A (mm)	UL B (mm)	LL A (mm)	LL B (mm)
SN1	0.54	0.54	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.52
SN2	0.54	0.54	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.52
SN3	0.55	0.55	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.52
SN4	0.55	0.55	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.52
SN5	0.54	0.53	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.52
SN6	0.54	0.55	0.54	0.54	0.56	0.56	0.52	0.52
Deviasi (mm)	0.01	0.01						

Tabel menunjukkan nilai kandungan co-monomer referensi yang diperoleh dari data perusahaan dan nilai absorbansi peak 771 cm^{-1} hasil analisis FTIR yang digunakan sebagai parameter kalibrasi.

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa masing-masing sampel menunjukkan nilai absorbansi peak 771 cm^{-1} yang berbeda. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kandungan co-monomer dalam struktur LLDPE menghasilkan perubahan respons spektral pada daerah rocking vibration. Semakin tinggi kandungan butene yang terdapat dalam material,

semakin besar pengaruh yang diberikan terhadap lingkungan vibrasi gugus CH_2 sehingga absorbansi peak 771 cm^{-1} mengalami perubahan yang dapat diamati secara jelas.

Fenomena tersebut terjadi karena inkorporasi butene ke dalam rantai utama polyethylene menghasilkan percabangan rantai pendek (short-chain branching). Kehadiran cabang-cabang tersebut menyebabkan keteraturan rantai polimer berkurang sehingga lingkungan vibrasi gugus metilena menjadi berbeda dibandingkan polyethylene yang lebih linear. Perubahan lingkungan vibrasi inilah yang menyebabkan intensitas absorbansi pada peak 771 cm^{-1} berubah seiring perubahan kandungan co-monomer.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peak 771 cm^{-1} tidak hanya berfungsi sebagai pita diagnostik untuk identifikasi butene secara kualitatif, tetapi juga memiliki sensitivitas yang cukup tinggi untuk digunakan sebagai parameter kuantitatif. Dengan kata lain, informasi yang awalnya digunakan untuk membedakan jenis co-monomer dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi parameter numerik yang mampu merepresentasikan jumlah co-monomer dalam material.

Untuk mengevaluasi hubungan antara absorbansi peak 771 cm^{-1} dan kandungan co-monomer, dilakukan pembangunan model regresi linear menggunakan nilai absorbansi langsung (A_{771}) tanpa normalisasi.

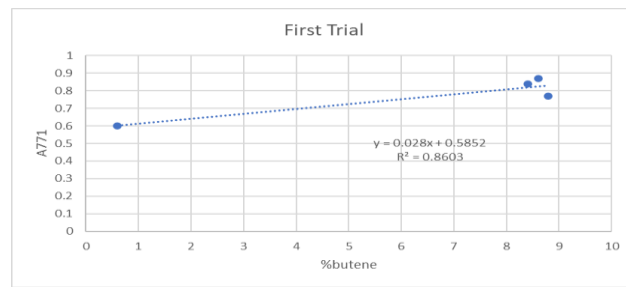
Tabel 4. Data Absorbansi dan %Co-Monomer (*First Trial*)

Sampel	$A_{771} (\square\square^{-\square})$	%butene (mass balance)
SN1	0.84	8.4
SN2	0.87	8.6
SN3	0.77	8.8
SN4	0.6	0.6

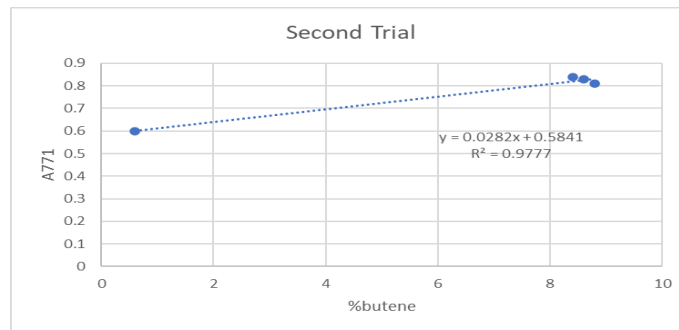
Tabel 5. Data Absorbansi dan %Co-Monomer (*Second Trial*)

Sampel	$A_{771} (\square\square^{-\square})$	%butene (mass balance)
SN1	0.84	8.4
SN2	0.83	8.6
SN3	0.81	8.8
SN4	0.6	0.6

Tabel menunjukkan data absorbansi peak 771 cm^{-1} yang digunakan untuk membangun model kalibrasi pada pengukuran pertama dan kedua.



Gambar 4. Grafik Regresi Linear Tanpa Rasio (*First Trial*)



Gambar 5. Grafik Regresi Linear Tanpa Rasio (*Second Trial*)

Hubungan antara absorbansi peak 771 cm^{-1} dan kandungan co-monomer referensi menunjukkan kecenderungan linear yang dapat digunakan untuk membangun model prediksi.

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5 terlihat bahwa peningkatan kandungan co-monomer diikuti oleh peningkatan absorbansi peak 771 cm^{-1} . Hubungan yang terbentuk menunjukkan bahwa perubahan struktur mikro akibat pembentukan short-chain branching memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik spektral material.

Pada First Trial diperoleh persamaan regresi: $y = 0,0280x + 0,5852$

dengan nilai koefisien determinasi: $R^2 = 0,8603$

Sedangkan pada Second Trial diperoleh persamaan: $y = 0,0282x + 0,5841$

dengan nilai: $R^2 = 0,9777$

Nilai koefisien determinasi yang diperoleh menunjukkan bahwa absorbansi peak 771 cm^{-1} memiliki hubungan yang cukup kuat terhadap kandungan co-monomer. Namun demikian, masih terdapat penyebaran data yang menunjukkan adanya faktor lain yang memengaruhi absorbansi selain kandungan co-monomer itu sendiri.

Perbedaan nilai R^2 antara First Trial dan Second Trial mengindikasikan bahwa absorbansi absolut masih dipengaruhi oleh variasi kondisi fisik sampel. Ketebalan film yang berbeda, kondisi permukaan sampel, serta fluktuasi intensitas spektrum dapat menyebabkan perubahan absorbansi yang tidak sepenuhnya berasal dari perubahan komposisi kimia material. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang dapat mengurangi pengaruh faktor-faktor tersebut.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun metode non-ratio mampu memberikan hubungan yang cukup baik antara absorbansi dan kandungan co-monomer, masih diperlukan proses normalisasi untuk meningkatkan stabilitas model.

Untuk meminimalkan pengaruh variasi fisik sampel, dilakukan normalisasi menggunakan rasio absorbansi antara peak diagnostik 771 cm^{-1} dan peak referensi 1462 cm^{-1} .

Tabel 6. Data Rasio A771/A1462 dan Kandungan Co-Monomer (*First Trial*)

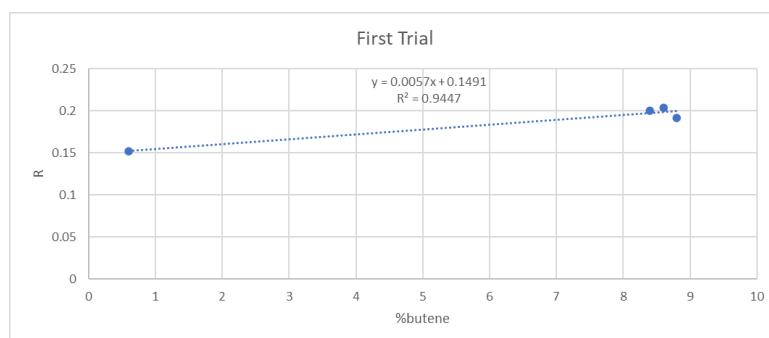
Sampel	A771 ($\square\square^{-\square}$)	A1462 ($\square\square^{-\square}$)	R	%butene (mass balance)
SN1	0.84	4.2	0.2	8.4
SN2	0.87	4.27	0.203747	8.6
SN3	0.77	4.01	0.19202	8.8
SN4	0.6	3.94	0.152284	0.6

Tabel 7. Data Rasio A771/A1462 dan Kandungan Co-Monomer (*Second Trial*)

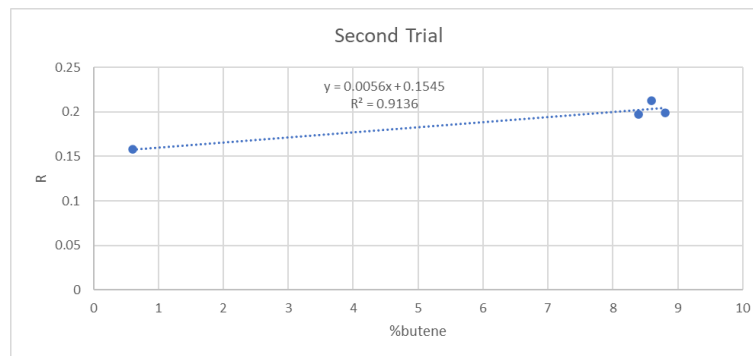
Sampel	A771 ($\square\square^{-\square}$)	A1462 ($\square\square^{-\square}$)	R	%butene (mass balance)
SN1	0.84	4.26	0.197183	8.4
SN2	0.83	3.9	0.212821	8.6
SN3	0.81	4.07	0.199017	8.8
SN4	0.6	3.8	0.157895	0.6

Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan data rasio absorbansi yang digunakan untuk membangun model kalibrasi setelah dilakukan normalisasi menggunakan peak referensi internal.

Peak 1462 cm^{-1} dipilih sebagai referensi karena berasal dari vibrasi scissoring gugus CH_2 pada backbone polyethylene yang relatif stabil terhadap perubahan kandungan co-monomer. Dengan menggunakan peak tersebut sebagai referensi internal, variasi absorbansi akibat ketebalan film dan kondisi pengukuran dapat diminimalkan



Gambar 6. Grafik Regresi Linear Metode Rasio (*First Trial*).



Gambar 7. Grafik Regresi Linear Metode Rasio (*Second Trial*).

Normalisasi menggunakan peak referensi menghasilkan hubungan yang lebih konsisten antara parameter spektral dan kandungan co-monomer.

Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7 terlihat bahwa data menunjukkan pola hubungan yang lebih teratur dibandingkan metode non-ratio. Penyebaran titik data menjadi lebih kecil dan hubungan yang terbentuk lebih konsisten. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa variasi yang sebelumnya berasal dari faktor fisik sampel berhasil diminimalkan melalui proses normalisasi.

Pada First Trial diperoleh persamaan: $y = 0,0057x + 0,1491$

Sedangkan pada Second Trial diperoleh persamaan: $y = 0,0056x + 0,1545$

Nilai R^2 yang diperoleh pada kedua pengukuran berada di atas 0,99. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rasio A771/A1462 memiliki kemampuan yang sangat baik dalam merepresentasikan perubahan kandungan co-monomer.

Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan peak referensi internal mampu meningkatkan kualitas model secara signifikan. Perubahan yang diamati setelah normalisasi lebih banyak merepresentasikan perubahan struktur mikro akibat penambahan butene dibandingkan pengaruh variasi fisik sampel. Oleh karena itu, metode rasio memberikan performa yang lebih baik dibandingkan metode non-ratio.

Tabel 8. Hasil Prediksi Co-Monomer Sampel Retain First Trial (A) Menggunakan Regresi First dan Second Trial

Sampel First Trial	A771 ($\square\square^{-\square}$)	%butene (mass balance)	Deviasi
SN5 Retain (Regresi First Trial)	0.9	11.24	0.03
SN5 Retain (Regresi Second Trial)	0.9	11.2	
SN6 Retain (Regresi First Trial)	0.76	6.24	0.00
SN6 Retain (Regresi Second Trial)	0.76	6.24	

Tabel 9. Hasil Prediksi *Co-Monomer* Sampel Retain *Second Trial* (B) Menggunakan Regresi *First* dan *Second Trial*

<i>Sampel Second Trial</i>	<i>A771</i> ($\square\square^{-\square}$)	<i>%butene (mass balance)</i>	<i>Deviasi</i>
SN5 Retain (Regresi <i>First Trial</i>)	0.89	10.89	0.03
SN5 Retain (Regresi <i>Second Trial</i>)	0.89	10.85	
SN6 Retain (Regresi <i>First Trial</i>)	0.85	9.46	0.02
SN6 Retain (Regresi <i>Second Trial</i>)	0.85	9.43	

Tabel menunjukkan hasil prediksi kandungan co-monomer pada sampel retain menggunakan model kalibrasi FTIR.

Berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9 terlihat bahwa model yang dibangun mampu digunakan untuk memperkirakan kandungan co-monomer pada sampel yang tidak digunakan dalam proses kalibrasi. Hasil prediksi menunjukkan bahwa hubungan antara karakteristik spektral dan kandungan co-monomer yang diperoleh selama tahap kalibrasi masih dapat diterapkan pada sampel lain yang memiliki karakteristik serupa.

Pada beberapa sampel, hasil prediksi berada pada rentang interpolasi sehingga model bekerja dalam domain kalibrasi yang tersedia. Sementara itu, beberapa sampel lainnya berada pada daerah ekstrapolasi sehingga ketidakpastian prediksi menjadi lebih tinggi. Meskipun demikian, keberadaan peak diagnostik 771 cm^{-1} yang masih terdeteksi pada spektrum FTIR menunjukkan bahwa struktur short-chain branching tetap terdapat dalam material.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peak 771 cm^{-1} memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kandungan co-monomer butene dalam produk LLDPE. Penggunaan rasio A_{771}/A_{1462} memberikan performa terbaik karena mampu meminimalkan pengaruh variasi fisik sampel dan menghasilkan hubungan yang lebih konsisten antara parameter spektral dan kandungan co-monomer.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa FTIR berpotensi digunakan sebagai metode screening cepat untuk memperkirakan kandungan co-monomer dalam kegiatan pengendalian mutu produk LLDPE. Meskipun metode ini tidak menggantikan teknik referensi seperti analisis struktur mikro berbasis NMR, FTIR dapat digunakan sebagai metode pendukung yang lebih cepat, sederhana, dan ekonomis untuk pemantauan kualitas produk secara rutin di lingkungan industri.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR) dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan memperkirakan kandungan co-monomer butene pada produk Linear Low Density Polyethylene (LLDPE). Analisis kualitatif menunjukkan bahwa pita serapan pada daerah sekitar 771 cm^{-1} merupakan peak diagnostik yang berkaitan dengan vibrasi rocking gugus metilena (CH_2) dan sensitif terhadap perubahan struktur mikro akibat pembentukan short-chain branching (SCB) hasil inkorporasi co-monomer butene ke dalam rantai polyethylene. Keberadaan peak tersebut memungkinkan identifikasi jenis co-monomer secara cepat melalui analisis fingerprint region sehingga dapat digunakan sebagai parameter utama dalam pengembangan metode analisis lebih lanjut.

Hasil analisis kuantitatif menunjukkan bahwa absorbansi peak 771 cm^{-1} memiliki hubungan yang baik dengan kandungan co-monomer butene pada sampel LLDPE. Model kalibrasi menggunakan metode non-ratio (A_{771}) menghasilkan hubungan linear antara absorbansi dan kandungan co-monomer, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8603 pada first trial dan 0,9777 pada second trial. Meskipun menunjukkan hubungan yang cukup kuat, metode non-ratio masih dipengaruhi oleh variasi fisik sampel seperti ketebalan film dan fluktuasi intensitas spektrum. Oleh karena itu, dilakukan normalisasi menggunakan metode rasio A_{771}/A_{1462} dengan memanfaatkan peak 1462 cm^{-1} sebagai referensi internal. Metode rasio menghasilkan hubungan yang lebih konsisten dengan nilai R^2 di atas 0,99 pada kedua pengukuran, yang menunjukkan bahwa normalisasi mampu meningkatkan stabilitas dan keandalan model prediksi.

Penerapan persamaan regresi terhadap sampel retain dan sampel butene kualitatif menunjukkan bahwa FTIR tidak hanya mampu digunakan untuk identifikasi kualitatif, tetapi juga dapat memberikan estimasi kandungan co-monomer secara kuantitatif. Sampel yang sebelumnya hanya teridentifikasi sebagai butene secara kualitatif berhasil dihitung kandungan co-monomernya dan menunjukkan nilai pada kisaran sekitar 11–14%. Hasil tersebut membuktikan bahwa informasi kualitatif yang diperoleh dari peak diagnostik 771 cm^{-1} dapat ditransformasikan menjadi informasi kuantitatif melalui pendekatan regresi linear. Secara keseluruhan, metode FTIR berbasis rasio A_{771}/A_{1462} memiliki potensi yang baik sebagai metode screening cepat, sederhana, dan ekonomis untuk mendukung kegiatan pengendalian mutu produk LLDPE di lingkungan industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel jurnal ini ditulis oleh Naila Agitia Ghaisani dan Indah kurniasari, Prodi Kimia UNNES. Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Lotte Chemical Titan Nusantara Tbk. telah memberikan kesempatan dan fasilitas selama pelaksanaan kegiatan magang serta penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pembimbing lapangan, supervisor, dan staf Laboratorium yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta bantuan teknis selama proses pengambilan dan analisis data. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada dosen pembimbing dari Program Studi Kimia atas bimbingan, masukan, dan dukungan yang diberikan selama penyusunan laporan magang hingga penyelesaian artikel ilmiah ini. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dan terselesaikan dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

- Billmeyer, F. W. (1984). *Textbook of polymer science* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Coates, J. (2020). *Interpretation of infrared spectra: A practical approach*. Wiley.
- Fried, J. R. (2021). *Polymer science and technology* (4th ed.). Pearson.
- Gong, X., Li, Y., Chen, Z., & Wang, H. (2024). FTIR analysis of polymer branching structure. *Journal of Polymer Science*, 62(3), 455–468.
- Göpperl, F., Hiltner, A., & Baer, E. (2023). Structure–property relationships in linear low-density polyethylene containing different α -olefin comonomers. *Polymer*, 270, 125798.
- Harris, D. C. (2016). *Quantitative chemical analysis* (9th ed.). W. H. Freeman and Company.
- Kaminsky, W. (2019). Metallocene catalysts for olefin polymerization. *Journal of Polymer Science*, 57(18), 1905–1913.
- Li, X., Zhang, Y., & Chen, H. (2022). Effect of comonomer type on mechanical and thermal properties of linear low-density polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(18), 52041.
- Mark, J. E. (2020). *Physical properties of polymers handbook* (2nd ed.). Springer.
- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2018). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (7th ed.). Pearson Education Limited.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2017). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). Wiley.
- Odian, G. (2004). *Principles of polymerization* (4th ed.). John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/047147875X>

- Odian, G. (2021). *Principles of polymerization* (5th ed.). Wiley.
- Ruiz Medina, M. D., & Ruales, J. (2025). Physicochemical and mechanical characterization of HDPE and LDPE films used in the postharvest packaging of banana (*Musa paradisiaca*). *Polymers*, 17(24), 3268. <https://doi.org/10.3390/polym17243268>
- Silverstein, R. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J., & Bryce, D. L. (2020). *Spectrometric identification of organic compounds* (9th ed.). Wiley.
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10777>
- Sperling, L. H. (2005). *Introduction to physical polymer science* (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471757128>
- Sperling, L. H. (2020). *Introduction to physical polymer science* (5th ed.). Wiley.
- Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470011149>
- Stuart, B. (2021). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Wiley.
- Wang, Z., Liu, Y., & Chen, Q. (2022). Influence of short-chain branching on morphology and toughness of polyethylene copolymers. *Polymer Testing*, 108, 107506.
- Zhang, Y., Li, H., & Chen, X. (2021). Effect of short-chain branching on crystallization behavior of polyethylene copolymers. *Polymer Testing*, 95, 107081