

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Asam Lemak Bebas

Data hasil penelitian menunjukkan nilai kadar asam lemak bebas pada beberapa jenis minyak goreng pada kondisi setelah digunakan sebanyak tiga kali penggorengan. Data hasil pengujian disajikan pada Lampiran 1, hasil analisis statistik ANOVA dan uji lanjut DMRT disajikan pada Lampiran 8, sedangkan ringkasan hasil disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Asam Lemak Bebas

Perbandingan Minyak Sawit dan Minyak Babi (%)	% Kadar Asam Lemak Bebas
100:0	$0,83 \pm 0,06^{bc}$
80: 20	$0,69 \pm 0,05^a$
60:40	$0,79 \pm 0,06^{ab}$
40:60	$0,87 \pm 0,02^{bcd}$
20:80	$0,96 \pm 0,05^d$
0:100	$0,89 \pm 0,07^{cd}$

Keterangan: Nilai rata-rata $\pm$ standar deviasi. Superskrip huruf kecil yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Berdasarkan data pada Tabel 4, hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa perbandingan minyak sawit dan minyak babi dalam minyak goreng yang digunakan untuk menggoreng ayam memiliki pengaruh signifikan ($P < 0,05$) terhadap kadar asam lemak bebas. Nilai kadar asam lemak bebas berkisar antara 0,69–0,96%, dengan nilai terendah terdapat pada campuran 80% minyak sawit dan 20% minyak babi sebesar 0,69%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada campuran 20% minyak sawit dan 80% minyak babi sebesar 0,96%. Secara umum, peningkatan proporsi minyak babi cenderung meningkatkan kadar asam lemak bebas, meskipun pola

peningkatannya tidak berlangsung secara linier pada seluruh perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi minyak memengaruhi stabilitas minyak selama pemanasan, karena perbedaan profil asam lemak dapat memengaruhi tingkat kerusakan minyak, terutama melalui reaksi hidrolisis dan oksidasi. Kadar asam lemak bebas yang meningkat menunjukkan terjadinya pemecahan trigliserida menjadi asam lemak bebas akibat pengaruh panas, keberadaan air dari bahan pangan, serta kontak dengan oksigen selama penggorengan. Akibatnya, mutu minyak mengalami penurunan, minyak menjadi lebih rentan mengalami ketengikan, perubahan warna, aroma, dan rasa, serta berpotensi menurunkan kualitas produk yang dihasilkan. Selain itu, seluruh sampel minyak telah melebihi batas maksimum kadar asam lemak bebas berdasarkan SNI 7709:2019, yaitu 0,30%, sehingga minyak hasil penggorengan pada seluruh perlakuan tidak memenuhi standar mutu berdasarkan parameter kadar asam lemak bebas.

Nilai kadar asam lemak bebas pada minyak sawit murni yang lebih tinggi dibandingkan campuran 80% minyak sawit dan 20% minyak babi menunjukkan bahwa pembentukan asam lemak bebas tidak hanya dipengaruhi oleh proporsi minyak babi, tetapi juga oleh kualitas awal minyak, kandungan air dari bahan pangan, serta interaksi komponen lipid selama proses penggorengan (Manzo *et al.*, 2019). Penambahan minyak babi dalam proporsi rendah mengindikasikan bahwa belum cukup meningkatkan laju degradasi lipid secara nyata, sedangkan dominasi minyak sawit dalam campuran masih dapat mempertahankan kestabilan minyak selama pemanasan. Selain itu, campuran minyak dengan komposisi asam lemak yang berbeda dapat menunjukkan karakteristik oksidatif yang berbeda

dibandingkan minyak tunggal akibat adanya interaksi antarkomponen lipid selama pemanasan (Dhyani *et al.*, 2023). Oleh karena itu, laju pembentukan asam lemak bebas pada campuran minyak tidak selalu berlangsung secara linear.

Peningkatan kadar asam lemak bebas terjadi akibat reaksi hidrolisis dan oksidasi selama proses penggorengan. Hal ini sesuai dengan pendapat Valle *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa proses *deep frying* pada suhu sekitar 160–180°C menyebabkan minyak mengalami degradasi, sedangkan kandungan air dari bahan pangan dapat mempercepat reaksi hidrolisis minyak. Bazina dan He (2018) juga menyebutkan bahwa hidrolisis trigliserida menghasilkan gliserol serta asam lemak bebas yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas minyak. Penurunan kualitas tersebut dapat terlihat dari meningkatnya kadar asam lemak bebas, terbentuknya senyawa hasil degradasi, penurunan stabilitas minyak, serta munculnya perubahan sifat sensori seperti warna yang lebih gelap, aroma tengik, dan rasa yang kurang baik. Selain itu, kontak minyak dengan oksigen selama pemanasan berulang juga memicu oksidasi lipid dan pembentukan berbagai senyawa degradasi yang semakin mempercepat kerusakan minyak.

Komposisi asam lemak pada minyak turut memengaruhi kestabilan oksidatif selama proses pemanasan. Minyak babi mengandung asam oleat dan asam linoleat dalam jumlah relatif tinggi sehingga lebih rentan mengalami oksidasi termal dibandingkan minyak dengan kestabilan oksidatif yang lebih baik. Kwek *et al.* (2022) menyatakan bahwa minyak dengan kandungan asam lemak tidak jenuh yang tinggi lebih mudah mengalami degradasi oksidatif selama pemanasan berulang. Pernyataan tersebut didukung oleh Gresley *et al.* (2024) yang menyebutkan bahwa

minyak dengan kandungan *polyunsaturated fatty acids* (PUFA) tinggi lebih rentan menghasilkan produk oksidasi lipid selama pemanasan. Selain itu, Li *et al.* (2018) juga menyebutkan bahwa kestabilan oksidatif minyak menurun seiring meningkatnya derajat ketidakjenuhan asam lemak pada minyak. Kondisi tersebut menyebabkan kadar asam lemak bebas cenderung lebih tinggi pada sampel dengan proporsi minyak babi yang lebih besar, terutama pada campuran 20% minyak sawit dan 80% minyak babi.

Pada sampel campuran minyak sawit dan minyak babi, yaitu 80:20, 60:40, 40:60, dan 20:80, nilai kadar asam lemak bebas berada di antara minyak sawit murni dan minyak babi murni. Hal tersebut menunjukkan adanya interaksi antara minyak nabati dan lemak hewani yang memengaruhi kestabilan campuran minyak selama proses penggorengan. Menurut Fallah dan Delouee (2026), Interaksi yang dimaksud berkaitan dengan perbedaan komposisi asam lemak pada kedua jenis minyak, yaitu minyak sawit yang relatif lebih banyak mengandung asam lemak jenuh dan memiliki komponen antioksidan alami, sedangkan minyak babi mengandung asam lemak tidak jenuh yang lebih rentan mengalami oksidasi selama pemanasan. Perbedaan komposisi tersebut dapat memengaruhi laju hidrolisis dan oksidasi pada campuran minyak, sehingga kadar asam lemak bebas yang terbentuk tidak selalu meningkat secara linear mengikuti proporsi masing-masing minyak. Oliveira *et al.* (2024) menyatakan bahwa campuran minyak dengan komposisi asam lemak yang berbeda dapat menunjukkan karakteristik oksidatif yang berbeda dibandingkan minyak tunggal akibat adanya interaksi antarkomponen lipid selama pemanasan. Dengan demikian, nilai kadar asam lemak bebas pada minyak

campuran dipengaruhi oleh keseimbangan antara komponen yang lebih stabil terhadap pemanasan dan komponen yang lebih mudah mengalami degradasi.

Namun, peningkatan kadar asam lemak bebas pada penelitian ini tidak menunjukkan pola yang sepenuhnya linear. Campuran 80% minyak sawit dan 20% minyak babi menghasilkan nilai asam lemak bebas yang lebih rendah dibandingkan minyak sawit murni. Menurut Hu *et al.* (2020), dominasi komponen minyak sawit dalam campuran masih mampu mempertahankan kestabilan dominasi komponen minyak sawit dalam campuran masih mampu mempertahankan kestabilan oksidatif minyak selama penggorengan karena kandungan asam lemak jenuh yang lebih tinggi dan ketahanan termo-oksidatif yang lebih baik. Penambahan minyak babi dalam proporsi rendah juga diduga belum cukup memengaruhi laju degradasi lipid secara signifikan. Di sisi lain, campuran 20% minyak sawit dan 80% minyak babi menunjukkan nilai asam lemak bebas tertinggi, yang mengindikasikan bahwa peningkatan proporsi minyak babi dalam campuran dapat mempercepat kerusakan minyak akibat oksidasi termal selama pemanasan berulang (Bilska dan Bartkowiak, 2025).

Pada minyak babi murni, nilai asam lemak bebas yang diperoleh tidak lebih tinggi dibandingkan campuran 20% minyak sawit dan 80% minyak babi. Hal ini sesuai dengan pendapat Chotimarkorn *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar asam lemak bebas selama penggorengan berulang tidak hanya dipengaruhi oleh proporsi minyak babi dalam campuran, tetapi juga oleh komposisi asam lemak dan dinamika degradasi minyak selama pemanasan. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa stabilitas minyak tidak hanya dipengaruhi oleh jenis minyak,

tetapi juga oleh interaksi komponen lipid selama proses *deep frying*. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Trimulya *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa penggunaan minyak secara berulang menyebabkan peningkatan kadar asam lemak bebas akibat oksidasi lipid selama proses penggorengan. Khaled *et al.* (2024) menyatakan bahwa peningkatan kadar asam lemak bebas menunjukkan terjadinya degradasi minyak selama proses pemanasan, yang ditandai dengan pembentukan produk oksidasi primer berupa lipid peroksida serta perubahan komposisi asam lemak akibat pemanasan berulang.

4.2 Bilangan Peroksida

Data hasil penelitian menunjukkan nilai bilangan peroksida minyak goreng pada kondisi setelah digunakan sebanyak tiga kali penggorengan. Data hasil pengujian disajikan pada Lampiran 2, hasil analisis statistik ANOVA dan uji lanjut DMRT disajikan pada Lampiran 9, sedangkan ringkasan hasil disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Uji Bilangan Peroksida

Perbandingan Minyak Sawit dan Minyak Babi (%)	Bilangan peroksida (mEq O ₂ /kg)
100: 0	4,69 ± 0,74 ^a
80:20	4,05 ± 1,17 ^a
60:40	9,86 ± 1,15 ^b
40:60	11,02 ± 1,42 ^b
20:80	11,34 ± 0,51 ^b
0:100	13,17 ± 0,82 ^c

Keterangan: Nilai rata-rata ± standar deviasi. Superskrip huruf kecil yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata ($P < 0,05$).

Berdasarkan Tabel 6, hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa perbandingan minyak sawit dan minyak babi dalam minyak goreng yang digunakan untuk

menggoreng ayam berpengaruh signifikan ($P < 0,05$) terhadap bilangan peroksida. Nilai bilangan peroksida berkisar antara 4,05–13,17 mEq O₂/kg, dengan nilai terendah terdapat pada campuran 80% minyak sawit dan 20% minyak babi sebesar 4,05 mEq O₂/kg, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada minyak babi murni sebesar 13,17 mEq O₂/kg. Secara numerik, nilai bilangan peroksida pada campuran 80:20 lebih rendah dibandingkan minyak sawit murni, namun keduanya tidak berbeda nyata. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan minyak babi pada proporsi rendah belum memberikan peningkatan bilangan peroksida yang signifikan. Rendahnya nilai bilangan peroksida pada campuran 80:20 dapat berkaitan dengan dominasi minyak sawit dalam campuran. Minyak sawit memiliki kestabilan oksidatif yang relatif baik karena komposisi asam lemaknya, terutama keberadaan asam lemak jenuh dan tak jenuh yang memengaruhi ketahanan minyak terhadap oksidasi selama pemanasan (Tinello *et al.*, 2018). Selain itu, minyak sawit juga mengandung antioksidan alami seperti tokoferol dan tokotrienol yang dapat membantu menekan pembentukan hidroperoksida selama proses pemanasan (Setiowati *et al.*, 2024).

Secara umum, peningkatan proporsi minyak babi menyebabkan kenaikan bilangan peroksida akibat tingginya kandungan asam lemak tidak jenuh, seperti asam oleat dan asam linoleat, yang lebih rentan mengalami oksidasi selama penggorengan berulang. Hal ini sesuai dengan Maghfirah dan Sigirowati (2026) yang menyatakan bahwa suhu tinggi dan paparan oksigen memicu pembentukan radikal lipid yang menghasilkan peroksida dan hidroperoksida sebagai produk oksidasi primer. Selain itu, Pietruszka *et al.* (2019) menyatakan bahwa tingkat ketidakjenuhan asam lemak memengaruhi kestabilan oksidatif minyak selama

pemanasan, yaitu semakin tinggi kandungan asam lemak tidak jenuh, semakin mudah minyak mengalami oksidasi dan membentuk senyawa peroksida. Pemanasan berulang juga dapat menyebabkan degradasi antioksidan alami dalam minyak, seperti tokoferol dan senyawa fenolik, sehingga kemampuan minyak dalam menghambat reaksi oksidasi menjadi menurun (Alkami *et al.*, 2022). Berdasarkan SNI 7709:2019, batas maksimum bilangan peroksida minyak goreng adalah 10 mEq O₂/kg. Sampel dengan komposisi 40% minyak sawit dan 60% minyak babi, 20% minyak sawit dan 80% minyak babi, serta minyak babi murni telah melebihi batas tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi proporsi minyak babi, kestabilan oksidatif minyak semakin menurun, pembentukan produk oksidasi primer semakin meningkat, dan mutu minyak goreng setelah penggorengan menjadi lebih rendah.

4.3 Warna

Data hasil penelitian menunjukkan nilai minyak goreng pada kondisi setelah digunakan sebanyak tiga kali penggorengan, yang meliputi intensitas rerata nilai L^* , a^* , b^* , dan *Hue angle* (°). Data hasil pengujian warna disajikan pada Lampiran 3, hasil analisis statistik ANOVA dan uji lanjut DMRT disajikan pada Lampiran 10, sedangkan ringkasan hasil disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Hasil Intensitas Warna Minyak Goreng

Perbandingan Minyak Sawit dan Minyak Babi (%)	Intensitas Warna			
	L*	a*	b*	Hue Angle (°)
100: 0	17,91 ± 4,30 ^a	-0,84 ± 0,13 ^a	9,47 ± 1,29 ^{ab}	95,21 ± 1,47 ^a
80:20	15,59 ± 1,39 ^a	1,08 ± 0,39 ^c	7,69 ± 0,38 ^b	81,90 ± 3,17 ^{ab}
60:40	17,24 ± 5,60 ^a	-0,25 ± 0,24 ^b	9,24 ± 0,21 ^{ab}	91,54 ± 1,46 ^{ab}
40:60	7,98 ± 0,96 ^b	3,81 ± 0,32 ^e	1,02 ± 1,42 ^c	13,16 ± 17,61 ^c
20:80	16,22 ± 1,33 ^a	1,96 ± 0,42 ^d	10,88 ± 1,90 ^a	79,81 ± 0,47 ^b
0:100	13,79 ± 1,77 ^a	0,92 ± 0,36 ^c	10,02 ± 1,20 ^a	84,86 ± 1,50 ^{ab}

Keterangan: Nilai dengan superskrip huruf kecil yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$).

Berdasarkan Tabel 7, analisis intensitas warna pada berbagai perlakuan perbandingan minyak sawit dan minyak babi dalam minyak goreng yang digunakan untuk menggoreng ayam menunjukkan adanya pengaruh signifikan ($P < 0,05$) terhadap nilai L*, a*, b*, dan Hue angle (°Hue). Nilai kecerahan L* tertinggi diperoleh pada minyak dengan komposisi 100% minyak sawit dan 0% minyak babi sebesar 17,91, sedangkan nilai terendah terdapat pada minyak dengan komposisi 40% minyak sawit dan 60% minyak babi sebesar 7,98. Pada parameter a*, nilai tertinggi diperoleh pada minyak dengan komposisi 40% minyak sawit dan 60% minyak babi sebesar 3,81, sedangkan nilai terendah terdapat pada minyak dengan komposisi 100% minyak sawit dan 0% minyak babi sebesar -0,84. Pada parameter b*, nilai tertinggi diperoleh pada minyak dengan komposisi 20% minyak sawit dan 80% minyak babi sebesar 10,88, sedangkan nilai terendah terdapat pada minyak dengan komposisi 40% minyak sawit dan 60% minyak babi sebesar 1,02.

Analisis *Hue angle* digunakan untuk menggambarkan arah warna dominan minyak berdasarkan hubungan antara nilai a^* dan b^* (Onasis *et al.*, 2022). *Hue* menunjukkan warna berdasarkan lokasi spektrum dan panjang gelombang dominan, sedangkan nilai a^* menunjukkan kecenderungan merah-hijau dan nilai b^* menunjukkan kecenderungan kuning-biru (Fadhlorrohman, 2023). Nilai *Hue angle* tertinggi diperoleh pada perlakuan 100:0 sebesar $95,21^\circ$, sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan 40:60 sebesar $13,16^\circ$. Secara umum, *Hue angle* mendekati 0° menunjukkan kecenderungan warna merah, sedangkan nilai mendekati 90° menunjukkan kecenderungan warna kuning. Sebagian besar perlakuan memiliki nilai *Hue angle* yang mendekati 90° , sehingga warna minyak cenderung berada pada kisaran kuning. Namun, perlakuan 40:60 menunjukkan nilai *Hue angle* yang jauh lebih rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi ini mengindikasikan adanya pergeseran warna minyak ke arah merah-kuning, yang didukung oleh tingginya nilai a^* dan rendahnya nilai b^* pada perlakuan tersebut. Perubahan ini menunjukkan bahwa perbedaan proporsi minyak sawit dan minyak babi dapat memengaruhi karakter warna minyak setelah proses penggorengan, terutama pada aspek kecerahan, kecenderungan warna merah-kuning, dan arah warna dominan.

Secara umum, penggunaan minyak secara berulang menyebabkan perubahan karakteristik warna minyak goreng yang ditandai dengan penurunan tingkat kecerahan serta perubahan intensitas warna merah dan kuning. Penurunan nilai L^* menunjukkan bahwa warna minyak menjadi semakin gelap setelah digunakan secara berulang. Mensah dan Kudomor (2026) menyatakan bahwa kondisi tersebut diduga disebabkan oleh akumulasi senyawa hasil oksidasi lipid, polimerisasi, serta

sis bahan pangan selama proses penggorengan. Pemanasan pada suhu tinggi dapat memicu pembentukan senyawa oksidatif seperti hidroperoksida, aldehid, dan keton yang berkontribusi terhadap perubahan warna minyak menjadi lebih gelap (Pratiwi dan Meikapasa, 2025).

Selain oksidasi lipid, perubahan warna minyak goreng juga dipengaruhi oleh reaksi pencoklatan selama proses penggorengan. Penggorengan ayam secara berulang hingga siklus ketiga dapat menyebabkan degradasi komponen pangan, terutama protein dan gula pereduksi, yang kemudian terakumulasi dalam minyak selama pemanasan. Mastuti *et al.* (2019) menyatakan bahwa Reaksi Maillard yang terjadi selama pemanasan menghasilkan senyawa melanoidin berwarna cokelat, sehingga minyak menjadi lebih gelap setelah digunakan secara berulang. Kondisi tersebut juga terlihat pada parameter a^* , yang menunjukkan kecenderungan warna merah-hijau pada minyak goreng. Peningkatan nilai a^* menunjukkan perubahan warna minyak ke arah merah kecokelatan akibat degradasi termal selama penggorengan. Nilai a^* yang lebih tinggi pada minyak dengan komposisi 40% minyak sawit dan 60% minyak babi mengindikasikan kemungkinan terjadinya akumulasi senyawa hasil degradasi dan produk pencoklatan selama pemanasan berulang. Kombinasi nilai L^* yang rendah dan a^* yang tinggi pada komposisi tersebut menunjukkan terbentuknya warna cokelat gelap akibat intensitas oksidasi lipid dan reaksi pencoklatan yang lebih tinggi selama proses *deep frying* (Chang *et al.*, 2019).

Parameter b^* menunjukkan intensitas warna kuning-biru pada minyak goreng. Nilai b^* yang relatif tinggi pada beberapa komposisi minyak dapat

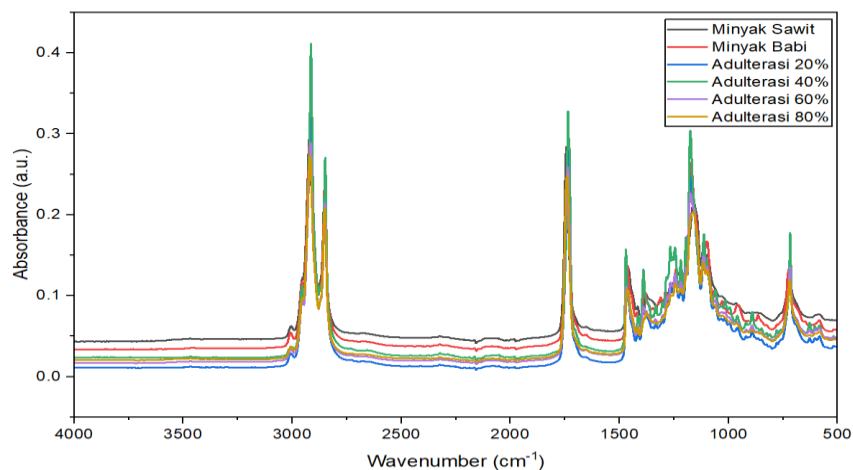
berkaitan dengan keberadaan pigmen alami pada minyak sawit, terutama karotenoid seperti β -karoten dan xantofil, yang memberikan warna kuning hingga oranye pada minyak. Rangkuti *et al.* (2025) menyatakan bahwa karotenoid pada minyak sawit tidak hanya berperan sebagai pigmen alami, tetapi juga sebagai antioksidan yang dapat membantu meningkatkan kestabilan oksidatif minyak. Namun, selama proses penggorengan berulang, paparan suhu tinggi dapat menyebabkan degradasi pigmen karotenoid sehingga intensitas warna kuning mengalami perubahan dan minyak cenderung menjadi lebih gelap. Puspita *et al.* (2018) menyatakan bahwa degradasi β -karoten akibat pemanasan dapat menyebabkan penurunan warna khas minyak dan berkontribusi terhadap perubahan warna minyak selama proses pemanasan.

Minyak babi memiliki karakteristik fisik yang berbeda dibandingkan minyak sawit akibat perbedaan komposisi asam lemak penyusunnya. Zhang *et al.* (2023) menyatakan bahwa minyak babi mengandung asam palmitat dan asam stearat dalam jumlah cukup tinggi, sehingga memiliki karakteristik lebih padat pada suhu ruang serta titik leleh yang relatif lebih tinggi dibandingkan beberapa minyak nabati. Selama proses penggorengan berulang, peningkatan suhu dapat menyebabkan oksidasi lipid, degradasi termal, dan pembentukan senyawa hasil oksidasi yang memicu perubahan warna minyak menjadi lebih gelap. Selain itu, reaksi pencoklatan non-enzimatis selama proses *deep frying* dapat menghasilkan senyawa berwarna coklat seperti melanoidin, sehingga minyak tampak lebih pekat setelah digunakan berulang kali. Pembentukan senyawa hasil oksidasi dan

melanoidin selama pemanasan berkontribusi terhadap perubahan warna minyak menjadi lebih gelap (Wolf *et al.*, 2026).

4.4 *Fourier Transform Infrared*

Pengujian FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi serta perubahan struktur kimia pada minyak goreng setelah digunakan sebanyak tiga kali penggorengan. Analisis FTIR dilakukan untuk mendeteksi adanya indikasi reaksi oksidasi, hidrolisis, dan degradasi senyawa yang terjadi selama proses pemanasan. Perubahan tersebut dapat diamati melalui pergeseran puncak serapan maupun perubahan intensitas pada spektrum FTIR yang disajikan pada Ilustrasi 2.



Ilustrasi 2. Spektrum FTIR Penggorengan 3x Sampel Minyak

Ilustrasi 2 menunjukkan spektrum FTIR minyak sawit, minyak babi, dan campurannya setelah penggorengan berulang. Spektrum FTIR dianalisis berdasarkan perubahan intensitas absorbansi pada bilangan gelombang tertentu, karena bilangan gelombang menunjukkan daerah serapan gugus fungsi, sedangkan absorbansi menunjukkan kuatnya serapan pada daerah tersebut. Berdasarkan

spektrum tersebut, terlihat adanya perbedaan intensitas dan pelebaran pita serapan pada beberapa bilangan gelombang, terutama pada campuran dengan proporsi minyak babi yang lebih tinggi. Perubahan intensitas absorpsi tersebut mengindikasikan adanya perubahan komposisi senyawa, degradasi trigliserida, serta oksidasi lipid selama proses penggorengan berulang. Gugus fungsi utama disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Gugus fungsi Umum FTIR pada Minyak Sawit dan Minyak Babi Penggorengan Berulang

Bilangan gelombang (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	Jenis vibrasi	Minyak Sawit	Minyak Babi
3006-3008	=C-H (cis)	<i>Stretching</i>	Intensitas menurun secara bertahap	Menurun signifikan
2922-2923	CH ₂	<i>Asymmetric stretching</i>	Perubahan kecil	Perubahan intensitas lebih jelas
2852-2853	CH ₂	<i>Symmetric stretching</i>	Relatif stabil	Sedikit berubah akibat degradasi
1743-1745	C=O ester trigliserida	<i>Stretching</i>	Sedikit meningkat	Meningkat lebih nyata
1710-1715	C=O (aldehid/keton)	<i>Stretching</i>	Muncul setelah pemanasan berulang	Jelas meningkat
1653-1655	C=C	<i>Stretching</i>	Penurunan moderat	Penurunan signifikan
1465	CH ₂	<i>Bending</i>	Stabil	Stabil
1377	CH ₃	<i>Bending</i>	Stabil	Perubahan kecil
1235-1236	C-O ester	<i>Stretching</i>	Sedikit menurun	Menurun lebih jelas
1160-1118	C-O	<i>Stretching</i>	Perubahan kecil	Perubahan akibat degradasi trigliserida
968	=C-H (trans)	<i>Out-of-plane bending</i>	Dapat meningkat	Meningkat jelas (indikasi isomerisasi)
721	(CH ₂) _n	<i>Rocking</i>	Tidak signifikan berubah	Relatif stabil
~3400	O-H (hidroperoksida)	<i>Stretching</i>	Pelebaran ringan	Pelebaran lebih jelas

Sumber: Bunaciu *et al.* (2021) dan Dyminska *et al.* (2022)

Berdasarkan identifikasi gugus fungsi pada Tabel 8, penggorengan berulang menyebabkan perubahan intensitas serapan pada daerah ketidakjenuhan, karbonil, dan hidroksil. Hal ini sesuai dengan pendapat Daoud *et al.* (2019) yang menyatakan bahwa perubahan tersebut mengindikasikan terjadinya oksidasi lipid, degradasi trigliserida, serta pembentukan produk oksidasi primer berupa hidroperoksida dan produk oksidasi sekunder seperti aldehid dan keton selama pemanasan. Perubahan spektrum tampak lebih jelas pada campuran dengan proporsi minyak babi yang lebih tinggi, karena komposisi asam lemak dapat memengaruhi kestabilan oksidatif minyak. Asam lemak tidak jenuh lebih rentan mengalami peroksidasi lipid, sehingga ikatan rangkapnya mudah teroksidasi dan menghasilkan senyawa hasil oksidasi selama proses penggorengan (Gresley *et al.*, 2024).

Pada pita sekitar $3006\text{--}3008\text{ cm}^{-1}$ ($=\text{C-H}$ cis), terjadi penurunan intensitas serapan yang berkaitan dengan berkurangnya ikatan rangkap pada asam lemak tidak jenuh. Penurunan ini menunjukkan bahwa asam lemak tidak jenuh mengalami oksidasi termal selama penggorengan berulang. Menurut Musakhanian *et al.* (2022), ikatan rangkap pada asam lemak tidak jenuh mudah bereaksi dengan radikal bebas saat pemanasan, sehingga membentuk hidroperoksida sebagai produk oksidasi primer dan senyawa karbonil sebagai produk oksidasi sekunder. Penurunan intensitas yang lebih jelas pada campuran dengan proporsi minyak babi lebih tinggi menunjukkan bahwa degradasi asam lemak tidak jenuh berlangsung lebih intensif, sejalan dengan perubahan daerah ketidakjenuhan pada spektrum FTIR akibat oksidasi lipid (Ali dan Chew, 2023).

Perubahan pada pita sekitar 1710–1715 cm^{-1} menunjukkan adanya perubahan gugus C=O, baik dari ester trigliserida maupun senyawa karbonil hasil oksidasi. Peningkatan intensitas pada daerah ini menunjukkan perubahan lingkungan kimia gugus karbonil akibat oksidasi dan hidrolisis selama pemanasan. Hal ini sesuai dengan pernyataan Wang *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa pemanasan berulang dapat mempercepat autooksidasi asam lemak tidak jenuh, menghasilkan hidroperoksida sebagai produk oksidasi primer yang kemudian terdekomposisi menjadi aldehid dan keton. Dengan demikian, peningkatan pita karbonil pada daerah ini mengindikasikan pembentukan produk oksidasi sekunder dan perubahan struktur trigliserida selama proses penggorengan (Chen *et al.*, 2022).

Pelebaran pita pada daerah sekitar 3400 cm^{-1} menunjukkan peningkatan serapan gugus O–H yang dapat berkaitan dengan pembentukan hidroperoksida selama pemanasan. Kondisi ini menunjukkan bahwa oksidasi primer berlangsung selama penggorengan berulang. Gharby *et al.* (2025) menyatakan bahwa oksidasi minyak dapat mengubah lingkungan gugus hidroksil dan karbonil akibat terbentuknya hidroperoksida serta senyawa hasil oksidasi lainnya. Perubahan pada daerah O–H tersebut juga sejalan dengan peningkatan bilangan peroksida pada penelitian ini, sehingga mendukung adanya hubungan antara pembentukan hidroperoksida dan peningkatan oksidasi primer minyak (Liu *et al.*, 2018).

Penurunan intensitas pita pada daerah 1653–1655 cm^{-1} menunjukkan berkurangnya ikatan C=C akibat oksidasi asam lemak tidak jenuh selama pemanasan. Selama *deep frying*, reaksi radikal bebas mempercepat peroksidasi lipid, sehingga ikatan rangkap mengalami degradasi dan menghasilkan

hidroperoksida serta senyawa karbonil. Zhou *et al.* (2022) menjelaskan bahwa oksidasi termal pada lipid tidak jenuh dapat menyebabkan konsumsi ikatan rangkap dan pembentukan produk oksidasi melalui mekanisme peroksidasi lipid. Selain itu, peningkatan pita sekitar 968 cm^{-1} mengindikasikan kemungkinan isomerisasi ikatan rangkap dari bentuk *cis* menjadi *trans* akibat paparan suhu tinggi selama penggorengan (Shukla, 2025).

Pada daerah $2922\text{--}2923\text{ cm}^{-1}$ dan $2852\text{--}2853\text{ cm}^{-1}$, perubahan intensitas serapan menunjukkan adanya perubahan pada vibrasi CH_2 dari rantai hidrokarbon alifatik trigliserida. Perubahan ini mengindikasikan bahwa rantai lipid mengalami degradasi termal selama penggorengan berulang. Perubahan pita CH_2 dapat berkaitan dengan oksidasi lipid dan perubahan struktur trigliserida akibat pemanasan minyak (Varma *et al.*, 2026). Intensitas perubahan yang lebih besar pada minyak babi dan campuran dengan proporsi minyak babi lebih tinggi menunjukkan bahwa komposisi lipid pada sampel tersebut berperan dalam menentukan kerentanan minyak terhadap degradasi selama *deep frying*. Hal ini sejalan dengan (Ali *et al.*, 2019), yang melaporkan bahwa perbedaan komposisi asam lemak memengaruhi stabilitas oksidatif minyak selama pemanasan, ditunjukkan oleh perubahan parameter oksidasi, komposisi asam lemak, dan spektrum FTIR.

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, jenis minyak pada penggorengan ayam secara berulang memengaruhi kualitas minyak goreng yang ditunjukkan oleh peningkatan kadar asam lemak bebas dan bilangan peroksida. Minyak dengan proporsi minyak babi lebih tinggi menunjukkan tingkat oksidasi lebih besar dibandingkan minyak sawit murni. Penggorengan berulang juga menyebabkan perubahan warna minyak yang ditandai dengan penurunan nilai L^* serta perubahan nilai a^* dan b serta pergeseran nilai Hue angle yang menunjukkan perubahan arah warna dominan minyak akibat oksidasi lipid dan reaksi pencoklatan selama *deep frying*. Analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR) menunjukkan perubahan gugus fungsi, terutama karbonil ($C=O$), hidroksil ($-OH$), dan ikatan rangkap asam lemak tidak jenuh yang mengindikasikan degradasi dan oksidasi lipid selama pemanasan berulang. Secara keseluruhan, penggunaan minyak secara berulang menurunkan kualitas minyak goreng secara kimia, fisik, dan berdasarkan spektrum FTIR.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disarankan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan analisis senyawa volatil untuk mengetahui pembentukan senyawa hasil oksidasi dan degradasi termal minyak goreng secara lebih mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Adenan, M., Prianto, F. W., Subagio, A., Wulandari, D., Prasetyaningtiyas, S., Cholifah, U., Irmadariani, R., dan Soseco, T. 2025. Measuring the performance of poultry slaughterhouse certification in supporting halal ecosystem: an empirical study in Jember Regency, Indonesia. *Journal of Accounting dan Economics Studies*. <https://doi.org/10.14419/w14pt709>.
- Ali, M. A., dan Chew, S. C. 2023. Efficacy of exogenous natural antioxidants in stability of polyunsaturated oils under frying temperature. *Journal of Food Masurement Characterization*. **17**(1), pp. 408–429. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01601-0>.
- Ali, M. A., Islam, M.A., Othman, N. H., Noor, A., dan Ibrahim, M. 2019. Effect of rice bran oil addition on the oxidative degradation and fatty acid composition of soybean oil during heating. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. **18**(4), pp. 427–438.
- Alkami, P.A., Kenari, R.E., Farahmandfar, R., dan Azizkhani, M. 2022. Investigation of the antioxidant effect of red quinoa (*Chenopodium formosanum* Koidz) carotenoid extracted on the oxidative stability of soybean oil. *Journal of Food Process Preservation* **46**, e16406. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.16406>.
- Amanda, T.D., Firdaus, M.L., Nursaadah, E., Nurhamidah, dan Ruyani, A. 2026. Effect of high temperature heating on free fatty acid content and peroxide number of packaged and bulk palm cooking oil. *Aceh Nutrition Journal*. **11**, pp. 272–282. <http://dx.doi.org/10.30867/action.v11i1.3158>
- Anagaw, Y.K., Ayenew, W., Limenh, L.W., Geremew, D.T., Worku, M.C., Tessema, T.A., Simegn, W., dan Mitku, M.L. 2024. Food adulteration : Causes, risks , and detection techniques — review. *Sage Journals*. **12**, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1177/20503121241250184>.
- Asokapandian, S., Swamy, G.J., dan Hajjul, H. 2019. Deep fat frying of foods : A critical review on process and product parameters. *Critical Reviews Food Science and Nutrition* **60**, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1688761>.
- Astuti, T. D. 2019. Pengaruh penggorengan berulang terhadap kualitas minyak goreng. *Borneo Journal of Medical Laboratory Technology*. **1**(2), pp. 62 - 65.
- Bahara, R., Syamsu, K., Sunarti, E., dan Jayanegara, A. 2024. Sustainable improvement of food SMEs through halal certification: A meta- analysis. <https://doi.org/10.1063/5.0183887>.
- Banas, K., Banas, A.M., Heussler, S.P., dan Breese, M.B.H. 2018. Influence of

- spectral resolution, spectral range and signal-to-noise ratio of Fourier transform infra-red spectra on identification of high explosive substances. *Spectrochim. Acta: Molecular and Bimolecular Spectroscopy*. **188**, pp. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.06.048>.
- Bazina, N., Ahmed, T., Almdaaf, M., Hallalah, H.M.O.A., dan Jibia, S. 2025. Chemical changes in deep-fat frying : reaction mechanisms , oil degradation, and health implications. *Journal of Food Science Nutrition*. **13**(1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70969>.
- Bazina, N., dan He, J. 2018. Analysis of fatty acid profiles of free fatty acids generated in deep-frying process. *Journal of food science and technology*. **55**(8), pp. 3085–3092. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3232-9>.
- Bi, J., Lin, Z., Li, Y., Chen, F., Liu, S., dan Li, C. 2021. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds of chicken breast. *Journal of Food Biochemistry*. **45**(8), e13770. <https://doi-org.proxy.undip.ac.id/10.1111/jfbc.13770>
- Bilska, A., dan Bartkowiak, M. K. 2025. The influence of vegetable oil addition levels on the fatty acid profile and oxidative transformation dynamics in liver sausage-type processed meats. *Journal of Foods*. **14**(380), pp. 1 - 20. <https://doi.org/10.3390/foods14030380>
- Bunaciu, A.A., Fleschin, S., dan Aboul-enein, H.Y. 2021. FTIR spectroscopy used for study the thermal degradation of lard. *Egyptian Pharmaceutical Journal*. **1**, pp. 1–7. <https://doi.org/10.4103/epj.epj>.
- Ceylan, M.M., dan Basturk, A. 2022. Investigation of the effects of uckun (*Rheum ribes* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), and propolis extracts on the thermal oxidation of palm olein oil during the deep-frying process. *Journal of Food Processing Preservation*. **46**(2), e16210. <https://doi.org/https://doi-org.proxy.undip.ac.id/10.1111/jfpp.16210>.
- Chang, C., Wu, G., Zhang, H., Jin, Q., dan Wang, X. 2019. Deep-fried flavor : characteristics , formation mechanisms , dan influencing factors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **60**(9), pp. 1496-1514.. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1575792>.
- Chen, J., Zhang, L., Sagymbek, A., Li, Q., Gao, Y., dan Yu, X. 2022. Formation of oxidation products in polar compounds of different vegetable oils during French fries deep-frying. *Journal of Food Processing Preservation*. **46**(11), e17004. <https://doi.org/https://doi-org.proxy.undip.ac.id/10.1111/jfpp.17004>.
- Chen, S.Y., Weng, M.H., Li, Z.Y., Wang, G.Y., dan Yen, G.C. 2022. Protective effects of camellia and olive oils against cognitive impairment via gut microbiota-brain communication in rats. *Journal of Food Function*. **13**(13), pp. 7168–7180.

- Cherif, A., dan Slama, A. 2022. Stability and Change in Fatty Acids Composition of Soybean , Corn , and Sunflower Oils during the Heating Process. *Journal of Food Quality*. **2022**(1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2022/6761029>.
- Chotimarkorn, C., Terasak, P., Permpoonpattana, P., dan Pastsart, U. 2025. Enhancing oxidative stability and antioxidant retention through synergistic blending of rice bran oil and palm olein during prolonged deep-fat frying. *Journal of Food Technology Research*. **12**(3), pp. 224–242. <https://doi.org/10.18488/jftr.v12i3.4450>.
- Daoud, S., Bou-maroun, E., Dujourdy, L., Waschatko, G., Billecke, N., dan Cayot, P. 2019. Fast and direct analysis of oxidation levels of oil-in-water emulsions using ATR-FTIR. *Journal of Food Chemistry*. **293**, pp. 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.005>.
- Dhyani, A., Chopra, R., Singh, P.K., dan Garg, M. 2023. Palm olein and perilla seed oil blends for the improvement of nutritional and thermal stability. *Grasas Y Aceites* **74**(3), pp. 1–12. <https://doi.org/10.3989/gya.0220221>
- Dyminska, L., Albegar, A. M. M., Sasiadek, W., Kucharska, E., Zajac, A., dan Hanuza, J. 2022. Spectroscopic evidence of thermal changes in plant oils during deep-frying — chemical and infrared studies. *Journal of Plants*. **11**(4), pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/plants11141813>
- Engelen, A. 2018. Analisis kekerasan, kadar air, warna dan sifat sensori pada pembuatan keripik daun kelor. *Journal of Agritech Science*, **2**(1), pp. 10–15. <https://doi.org/10.30869/jasc.v2i1.173>
- Fadhlurrohman, I. 2023. Karakteristik warna (*hue, chroma, whiteness index*), rendemen, dan persentase *whey* keju dengan penambahan teh hitam orthodox (*Camellia sinensis* var. *assamica*). *Jurnal Ilmiah Teknologi dan Industri Pangan*. **8**(1), pp. 10–19. <https://doi.org/10.33061/jitipari.v8i1.8133>
- Fallah, F., dan Delouee, S. A. 2026. Oxidative stability and discarding time of two frying oil blends during deep frying of potatoes. *Journal of Food Processing and Preservation*. pp. 1 - 9
- Freis, A. M., dan Vemulapalli, S. P. B. 2025. Analysis of the generation of harmful aldehydes in edible oils during sunlight exposure and deep-frying using high-field proton nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Foods*, **14**(3), 1 - 12
- Gharby, S., Asbbane, A., Nid, M., dan Gagour, J. 2025. Vegetable oil oxidation : Mechanisms , impacts on quality , and approaches to enhance shelf life. *Journal of Food Chemistry*. **28**, pp. 1 - 19. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102541>.
- Ghazali, H.H., dan Azira, N. 2021. Analysis of pork adulteration in recycled frying

- oils using raman spectroscopy. *Journal of Halal Research*. **4**(1), pp. 2–5. <https://doi.org/10.2478/mjhr-2021-000>.
- Gresley, L. A., Ampem, G., Grootveld, M., dan Naughton, D. P. 2024. Suppressing thermo-induced peroxidation products in peroxidatively-susceptible frying oils by the employment of culinary oil blend formulations. *Journal of Food Composition Analysis* **125**, 105747. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105747>.
- Hu, M., Pan, K., Niu, Y., Chen, S., Yoong, J. H., Tarmizi, A. H. A., dan Zhang, G. 2020. Comparative assessment of thermal resistance of palm stearin and high oleic blended oil when subjected to frying practice in fast food restaurants. *Journal of Oil Palm Research*. **32**(1), pp. 90–102. <https://doi.org/10.21894/jopr/2020.0006>
- Husain, F., dan Marzuki, I. 2021. Pengaruh temperatur penyimpanan terhadap mutu dan kualitas minyak goreng kelapa sawit. *Serambi Engineering Jurnal*. **6**(4), pp. 2270–2278. <https://doi.org/10.32672/jse.v6i4.3470>
- Husnah, dan Nurlela 2020. Analisa bilangan peroksida terhadap kualitas minyak goreng sebelum dan sesudah dipakai berulang. *Jurnal Redoks*. **5**, pp. 65–71. <https://doi.org/10.31851/redoks.v5i1.4129>
- Khaled, B.M., Biswas, M., Ann, A., Alam, A., Alim, A., Hossain, E., Saqib, N., Rana, S., dan Rahman, S. 2024. Detection of the changes in fatty acid composition and physicochemical properties in selected edible oils heated at different degrees of time. *Food Chemistry Adventure*. **4**, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100716>.
- Kishimoto, N., dan Takano, N. 2021. Enhanced moisture loss and oil absorption of deep-fried food by blending extra virgin olive oil in rapeseed oil. *Journal of Food Science and Technology*. **27**(1), pp. 63–68. <https://doi.org/10.3136/fstr.27.63>.
- Kurniawati, A., Latifasari, N., Budiarly, D., Arlian, F., dan Lu'lu, A. 2024. Peningkatan stabilitas oksidatif pada minyak kedelai dalam mempertahankan kualitas minyak goreng pada penggorengan berulang. *Jurnal Teknologi Pangan Media Informasi dan Komunikasi Ilmu Teknologi Pertanian*. **15**(1), pp. 83–94. <https://doi.org/10.35891/tp.v15i1.4728>.
- Kwek, E., Yan, C., Ding, H., Hao, W., He, Z., Ma, K.Y., Liu, J., Zhu, H., dan Chen, Z. 2022. Effects of thermally-oxidized frying oils (corn oil and lard) on gut microbiota in hamsters. *Journal of Antioxidants*. **11**, pp. 1–19.
- Li, J., Liu, J., Sun, X., dan Liu, Y. 2018. The mathematical prediction model for the oxidative stability of vegetable oils by the main fatty acids composition dan thermogravimetric analysis. *LWT - Food Science and Technology*. **96**, pp.

51–57. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.003>.

- Liu, Y., Wang, Y., Cao, P., dan Liu, Y. 2018. Combination of gas chromatography-mass spectrometry and electron spin resonance spectroscopy for analysis of oxidative stability in soybean oil during deep-frying process. *Journal of Food analytical methods*, **11**(5), pp. 1485-1492. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-1132-7>.
- Loganathan, R., Tarmizi, A.H.A., Vethakkan, S.R., dan Teng, K.-T. 2022. A review on lipid oxidation in edible oils. *Journal of Analytical Science*. **26**, pp. 1378–1393.
- Maghfirah, I., dan Sigiyo, O. N. 2026. *Kimia Pangan*, 1st ed. KBM Indonesia, Yogyakarta.
- Mahiran, S. N. S. N., Kadir, N. H. A., Maulidiani, M., Mohamad, T. R. T., Gooderham, N. J. dan Alam, M. 2023. Multivariate modelling analysis for prediction of glycidyl esters and 3-monochloropropane-1, 2-diol (3-MCPD) formation in periodically heated palm oil. *Journal of Heliyon*. **9**(10). pp. 1 - 19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20413>.
- Maliki, N. N., Abu Bakar, A., Hashim, N. H., Zainal Abidin, Z. H., Cheng, S. F., & Tajuddin, H. A. (2026). Smartphone-based colorimetry as a rapid preliminary screening method for monitoring reheated cooking oil degradation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **20**. pp. 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11694-026-04125-z>
- Manzo, N., Santini, A., Pizzolongo, F., Aiello, A., dan Romano, R. 2019. Effects of alpha-tocopherol and oleic acid content in sunflower oil subjected to discontinuous and prolonged frying process. *Journal of Progress in Nutrition*. **21**(3), pp. 686-692. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i3.7892>
- Marikkar, J.M.N., Yanty, N.A.M., Musthafa, S., dan Miskandhar, M.S. 2022. Recent advances in plant-based fat formulation as substitute for lard. *Grasas y Aceites*. **73**(2), pp. 1–17. <https://doi.org/10.3989/gya.0439211>
- Mastuti, T.S., Fardiaz, D., dan Faridah, D.N. 2019. Profil senyawa polar tiga jenis minyak goreng selama penggorengan tahu dan tempe. *Jurnal Teknologi dan Indonesia Pangan*. **30**(1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.6066/jtip.2019.30.1.1>.
- Maszewska, M., Florowska, A., Matysiak, K., Marciniak-Łukasiak, K., dan Dłużewska, E. 2018. The study of palm and rapeseed oil stability during frying. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. **91**, pp. 103–108. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.014>.
- Mavani, N.R., Ali, J.M., Mutalib, S.A., Hussain, M.A., Rahman, N.A., dan Hashim, H. 2025. Fuzzy logic-based approach for porcine DNA determination in meat

- products. *Journal of Science Food*. **9**(186), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00548-y>
- Megawati, D.S., Fauziyah, B., Maimunah, S., dan Wafi, A. 2020. Profil FTIR minyak ikan dan lemak babi serta perbandingannya sebagai dasar penentuan autentifikasi halal. *Alchemy : journal of chemistry*. **8**(1), pp. 9–17. <https://doi.org/10.18860/al.v8i1.9818>
- Mensah, E.O., dan Kudomor, I. 2026. Thermal degradation and safety of repeatedly heated palm kernel oil during deep frying. *Journal of Food Safety and Health*. **4**(1), pp. 147–155. <https://doi.org/10.1002/fsh3.70044>.
- Minkowski, K., Bartosiak, M., dan Cieminski, D. 2021. Effect of chlorophyll pigments on the course of photosensitized oxidation of rapeseed oil. *Żywność* **2**, pp. 95–109. <https://doi.org/10.15193/zntj/2021/126/372>.
- Mohamed, S.A., Azis, A.S.A., Dabwan, A.H.A., Abdullah, A.H., dan Mohamed, A.H. 2022. Physiochemical properties of palm olein. *Journal of Physics*. **2266**, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2266/1/012007>.
- Mokari, A., Guo, S., dan Bocklitz, T. 2023. Exploring the steps of infrared (ir) spectral analysis: pre-processing, (classical) data modelling, and deep learning. *Journal of Molecules*. **28**(19), pp. 1–21 <https://doi.org/10.3390/molecules28196886>.
- Mortas, M., Awad, N., dan Ayvaz, H. 2022. Adulteration detection technologies used for halal / kosher food products : an overview. *Journal of Discover Food* **2**(15), pp. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00015-7>.
- Multari, S., Marsol-vall, A., Heponiemi, P., Suomela, P., dan Yang, B. 2019. Changes in the volatile profile, fatty acid composition dan other markers of lipid oxidation of six different vegetable oils during short-term deep-frying. *Journal of Food Research International* **122**, pp. 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.026>.
- Musakhanian, J., David, J., dan Masumi, R. 2022. Oxidative stability in lipid formulations : a review of the mechanisms, drivers, and inhibitors of oxidation. *Journal of AAPS PharmSciTech* **23**(151), pp. 1–30. <https://doi.org/10.1208/s12249-022-02282-0>.
- Nagy, K., Iacob, B., dan Bodoki, E. 2024. Investigating the thermal stability of omega fatty acid enriched vegetable oil. *Journal of foods*. **13**(18), pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/foods13182961>
- Nazarena, Y., Eliza, Terati, dan Meilina, A. 2022. Pengaruh frekuensi penggorengan bahan makanan terhadap angka peroksida. *Jurnal Sehat Mandiri* **17**(2), pp. 46–56.

- Nur, S., Nor, S., Huda, N., Kadir, A., dan Maulidiani, M. 2023. Heliyon Multivariate modelling analysis for prediction of glycidyl esters dan 3-monochloropropane-1, 2-diol (3-MCPD) formation in periodically heated palm oil. *Journal of Heliyon*. **9**, e20413. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20413>.
- Oliveira, S.M. de, Jesus, T.A.B. de, Lariu, K.A., dan Jesus, C.G. da S. 2024. Quality investigation of the most consumed refined seed oils after French fries ' domestic short-term deep-frying process. *Rev. Obs. La Econ. Latinoam*. **22**, pp. 1–21. <https://doi.org/10.55905/oelv22n3-189>.
- Onasis, J.A., Hermanto, dan Priyanto, G. 2022. Pengaruh jenis minyak nabati terhadap karakteristik mayones dengan bahan penstabil gumxanthan. *Journal of Scientech Research and Development*. **4**(2), pp. 210–227. <https://doi.org/10.56670/jsrd.v4i2.68>
- Pećina, M., Luković, Z., Škorput, D., dan Bolčić, M. 2018. Relationship between intramuscular fat content and fatty acid composition of pork. *Journal of Central European Agriculture*. **19**(4), pp. 840–845. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/19.4.2325>
- Pietruszka, E.K., Ostasz, L., dan Tataruch, K. 2019. The Dynamics of Oxidative Changes in Selected Fats During The Frying of French Fries. *Acta Sci. Pol.* **18**, 293–303.
- Prabawati, S.Y., dan Fajriati, I. 2018. Analisis Lemak Sapi dan lemak babi menggunakan *Gas Chromatography* (GC) dan *Fourier Transform Infra Red Spectroscopy Second Derivative* (FTIR-2D) untuk autentifikasi halal. *Jurnal Halal*. **1**, pp. 89–96. <https://doi.org/10.14710/halal.v1i2.4119>
- Pratiwi, N.P.C., dan Meikapasa, N.W.P. 2025. Analisis total *oxidation value* minyak goreng bekas pada beberapa produk olahan pangan di pasaran. *Jurnal Teknologi dan Mutu Pangan*. **3**(2), pp. 88–95. <https://doi.org/10.30812/jtmp.v3i2.4782>.
- Purnama, K.O., Setyaningsih, D., Hambali, E., dan Taniwiryo, D. 2020. Processing, characteristics, and potential application of red palm oil - a review. *International Journal of Oil Palm*. **3**(2), pp. 40 - 55
- Puspita, D., Tjahjono, J.D., Samalukang, Y., Toy, B.A.I., dan Totoda, N.W. 2018. Isolasi dan Uji Termostabilitas Pigmen Cabai Katokon (*Capsicum chinense* Jacq.) *Journal of Food Life Science*. **2**, pp. 9–16.
- Rahayu, W.S., Buono, E.C., dan Raharjo, A.S. 2024. Analisis cepat kandungan metamizole dan deksametason pada jamu pegal linu dengan metode FTIR kombinasi dengan kemometrik. *Jurnal Farmasi Indonesia*. **20**(2), pp. 178–182. <https://doi.org/10.30595/pharmacy.v20i2.19628>

- Rangkuti, I.U.P., Syukri, M., Lubis, N.Y., dan Elisabeth, J. 2025. Hubungan kondisi buah sawit terhadap stabilitas warna minyak sawit. *Jurnal Teknik Pengolahan Hasil Perkebunan Kelapa Sawit dan Karet*. 7(1), pp.71–83.
- Riyani, C., Putro, J.S., Sumbi, D., Cahyadi, R., dan Wulandari, D.T. 2025. Pelatihan pengolahan pangan lokal dengan metode *deep frying* di Desa Lemo II Kabupaten Barito Utara. *Jurnal Pengabdian Inovasi Lahan Basah Unggul*. 4(4), pp. 259–269. <https://doi.org/10.20527/ilung.v4i4.15154>
- Safari, A., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2024). Two-phase (solid–fluid) coupled transfer phenomena modeling during frying of potato slices: effect of the product surface-to-volume ratio. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **149**(8), pp. 3181–3196. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-12929-8>
- Sandra, S., Lutfi, M., danChoirunnisa, N.I. 2024. Pengaruh suhu dan frekuensi penggunaan minyak goreng kelapa (*Cocos nucifera* L .) terhadap karakteristik fisikokimia kentang goreng. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem* **12**(2), pp. 193–204. <https://doi.org/10.29303/jrpb.v12i2.664>.
- Sari, Y.P., Putri, A.R., Tamaroh, S., Setiyoko, A., dan Esti, T. 2025. Fast detection of white pepper adulteration using FTIR-ATR Spectroscopy and chemometrics. 5, pp. 66–71.
- Setiowati, R.D., Ernayunita, Panjaitan, F.R., Mardiana, C., dan Lubis, M.I. 2024. Prospective oil palm (*Elaeis* sp) materials for high tocotrienol content. *IOP Conference Series Earth Environmental Science* 1308, pp. 12–50. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1308/1/012050>
- Shukla, U. 2025. Fourier transform infrared spectroscopy : A power full method for creating fingerprint of molecules of nanomaterials. *Journal of Molecular Structure*. 1322, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140454>.
- Sihombing, Y.A., danRitonga, M.A. 2021. Detection of the cooking oil aroma by using a gas sensor in an electronic nose system Detection of the cooking oil aroma by using a gas sensor in an electronic nose system. *Journal of Physics*). 1811, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012105>.
- Silalahi, R.L.R., Sari, D.P., danDewi, I.A. 2017. Pengujian *Free Fatty Acid* (FFA) dan *colour* untuk mengendalikan mutu minyak goreng produksi PT . XYZ. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*. 6, pp. 41–50. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2017.006.01.6>
- Standar Nasional Indonesia, 2019. SNI 7709:2019 tentang Syarat Mutu Minyak Goreng. Badan Standarisasi Nasional
- Tan, S.L., Hanani, S., Suhaimy, M., Azimah, N., dan Samad, A. 2022. Evaluation

- of fresh palm oil adulteration with recycled cooking oil using GC-MS dan ATR-FTIR spectroscopy : A review. *Journal of Food Science*. **40**, pp. 1–14. <https://doi.org/10.17221/116/2021-CJFS>.
- Tang, B., dan Zhang, F. 2025. Fourier Transform Infrared Spectroscopy, in: energy storage materials characterization: determining properties dan performance: **1**(2), pp. 419–446. <https://doi.org/10.1002/9783527834679.ch17>.
- Taufik, M., dan Atma, Y. 2021. Perubahan Karakteristik fisikokimia minyak selama penggorengan dengan metode *deep fat frying*: kajian literatur. *Jurnal Teknologi Indonesia Pertanian*. **15**, pp. 964–975. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v15i3.10436>
- Tinello, F., Lante, A., Bernardi, M., Cappiello, F., Galgano, F., Caruso, M.C., dan Favati, F. 2018. Comparison of OXITEST and RANCIMAT methods to evaluate the oxidative stability in frying oils. *Journal of European Food Research and Technology*. **244**, pp. 747–755. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2995-y>.
- Triawan, D.A., Ghufira, G., Adfa, M., dan Rafi, M. 2022. Pencirian Kopi Robusta Bengkulu dari Kemungkinan Bahan Pencampur Menggunakan Kombinasi Spektroskopi FTIR dan Kemometrik. *Jurnal AgriTECH*. **42**(4), pp. 321–328. <https://doi.org/10.22146/agritech.64432>
- Trimulya, A., Khairunnisa, A., dan Defira, C. 2025. Effect of Heating Duration in Free Fatty Acid dan Sensory Quality of Palm Cooking Oil. *Journal of Food Technology*. **02**, pp. 1–10. <https://doi.org/10.64723/sftj.v2i01.8>
- Ulfah, M. 2021. Minyak berbasis sawit: potensi & pengembangan untuk bahan pangan, 1st ed. Indonesia.
- Untari, B., Miksusanti dan Ainna, A. 2020. Penentuan kadar asam lemak bebas dan kandungan jenis asam lemak dalam minyak yang dipanaskan dengan metode titrasi asam basa dan kromatografi gas. **5**(1), pp. 1–10.
- Valle, C., Echeverría, F., Chávez, V., Valenzuela, R., dan Bustamante, A. 2024. Deep frying impact on food dan oil chemical composition strategies to reduce oil absorption in the final product. *Journal of Food Safety Health*. **2**(4), pp. 414–428. <https://doi.org/10.1002/fsh3.12056>.
- Varma, S.O., Vishwakarma, A.L., Sonawane, M.R., Garad, N.P., dan Kumbharkhane, A.C. 2026. A hybrid chemometric dan deep learning model for monitoring quality loss in thermally processed edible oils. *Journal Food Research International*. **238**, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.119497>.
- Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H., dan Wei, F. 2023. Lipid oxidation in food

- science and nutritional health : A comprehensive review. *Journal of Oil Crop Science*. **8**(1), pp. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>.
- Wolf, M., Ferreira, J.P., Teleken, J.T., Angonese, M., Carciofi, B.A.M., dan Laurindo, J.B. 2026. Modeling color and chemical changes in pork loin during controlled roasting : browning in focus. *Journal of Food Process Engineering*. **49**(1), pp. 1–16. <https://doi.org/10.1111/jfpe.70305>.
- Yadav, D.K., Kadam, P., Wadikar, D.D., Kannan, V., dan Semwal, A.D. 2023. Changes in the quality attributes of edible vegetable oils during deep frying concerning defence ration. *Defence life science journal*. **8**(4), pp. 378–389. <https://doi.org/10.14429/dlsj.8.18854>
- Yang, X., Pei, Z., Du, W. dan Xie, J. 2023. Characterization of volatile flavor compounds in dry-rendered beef fat by different Solvent-Assisted Flavor Evaporation (SAFE) Combined with GC–MS, GC–O, and OAV. *Journal of Food*. **12**(17), pp. 1 - 15. <https://doi.org/10.3390/foods12173162>
- Zainuri, A.M., Patma, T.S., dan Suharto, N. 2022. Analisis perpindahan massa dan uji organoleptik pembuatan nugget ikan laut menggunakan *deep fat frying*. *Jurnal Teknologi Ilmu dan Aplikasi*. **3**, pp. 1–8.
- Zhang, L., Zhang, K., Yang, H., Yue, K., Liu, R., dan Bi, Y. 2023. Characterization of lard from different adipose tissues : Physicochemical properties, thermodynamics characteristics and crystallization behaviors. *Journal of Food Composition and Analysis*. **115**, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105021>.
- Zhou, Z., Li, Y., Zhao, F., Xin, R., Huang, X., Zhang, Y., Zhou, D., dan Qin, L. 2022. Unraveling the Thermal Oxidation Products dan Peroxidation Mechanisms of Different Chemical Structures of Lipids: An Example of Molecules Containing Oleic Acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **51**, pp. 1610 - 16423. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06221>.
- Zhuang, Y., Dong, J., He, X., Wang, J., Li, C., Dong, L., dan Wang, S. 2022. Impact of heating temperature dan fatty acid type on the formation of lipid oxidation products during thermal processing. *Journal Frontiers Nutrition*. **9**, pp. 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.913297>.
- Zuliyama, Rahmanpiu, dan Mulyana, W.O. 2023. Deskripsi kualitas minyak goreng hasil pemanasan. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*. **12**, pp.57–63.