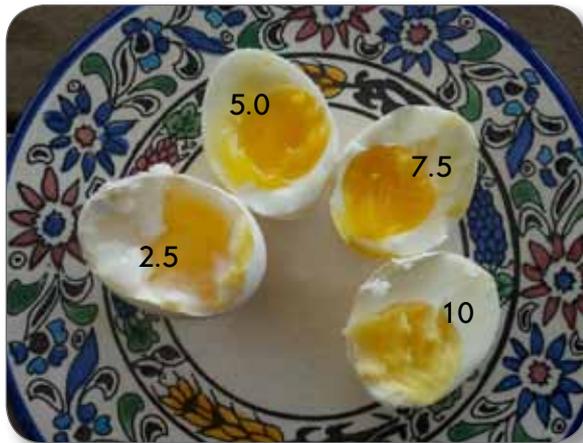


כמה קשה להכין (ולהבין) ביצה קשה

מאת מלכה יאיון*

מבנה הביצה והרכבה

מכיוון שנהוג לכנות במילה "חלבון" גם את הלבן של הביצה וגם את החלבונים עצמם - כגון האלבומין, נתייחס בקטע הבא לנוזל הצמיג, השקוף שבחלקו הוא לבן ובחלקו חסר צבע, כאל "חלבון", ולחלבונים עצמם כאל "אלבומין".



איור 1: ביצים שבושלו פרקי זמן שונים (מספר דקות הבישול מופיע על הביצה)

קליפת הביצה בנויה בעיקר מסיידן פחמתי (CaCO_3) ויש בה יותר מ-10,000 חורים קטנים מאוד (pores). היא עוטפת שני קרומים נוספים שמונעים חדירה של חיידקים. בין שני הקרומים הללו קיים כיס "אוויר" אשר גדל ככל שהביצה מתיישנת והוא ממוקם בקצה הפחות קעור של הביצה (ראו איור 2).

הביצה מכילה את כל המזון שנחוץ להתפתחות האפרוח. היא

מי מאתנו אינו יודע להכין ביצה?! בעבור רובנו הכנת ביצה שייכת לאחת ההתנסויות הראשונות שלנו במטבח. אבל מי מאתנו יודע להכין ביצה **בדיוק** כפי שמבקשים מאתנו? בעלי אוהב ביצה עין מאוד מיוחדת "החלבון קשה יחסית, הקצוות שרופים, אך החלמון רך". בתי לעומת זאת אוהבת ביצה קשה מושלמת: "החלבון חלק לגמרי, והחלמון רך". מסתבר שהכנת ביצה אינה עניין פשוט כל כך, והמדע מאחורי משימה זו פשוט עוד פחות, אבל בכל זאת ננסה לתת קצת מידע, להסביר חלק מה"תקלות" ולתת מספר "טיפים" על מנת לשפר במקצת את הביצועים שלנו במטבח.

הכימיה העוסקת בביצים כוללת היבטים מגוונים כגון קצף (מרנג), סופלה ואת כל סוגי הביצים. במאמר זה נתמקד בביצה קשה, הביצה שלכאורה היא הקלה ביותר להכנה. באופן עקרוני המתכון פשוט - מבשלים ביצה במים עם קצת מלח ולאחר שהמים רתחו, מבשלים על אש קטנה למשך 8-10 דקות.

אבל נסו לשאול 5 אנשים איך הם מכינים ביצה קשה - תקבלו 10 מתכונים המלווים בטיפים שאינם כתובים במתכונים להצלחת המשימה. חלק ממליצים להתחיל עם מים רותחים, חלק - בטמפרטורת החדר, חלקם מוסיפים למים מלח, חלקם חומץ. יש שממליצים לחזור את הקליפה, וכאלה שיהירו מפני חירורה. ויש גם טיפים נלווים! איך מקלפים? איך מונעים שהביצה תיסדק? איך יודעים שהביצה מוכנה? איך יודעים שהביצה טרייה? ועוד. על מנת להתאים את טכניקת הבישול לטעמנו, חשוב להכיר את מבנה הביצה והרכבה ולהבין מה קורה במהלך בישול ביצה ברמה המולקולרית.

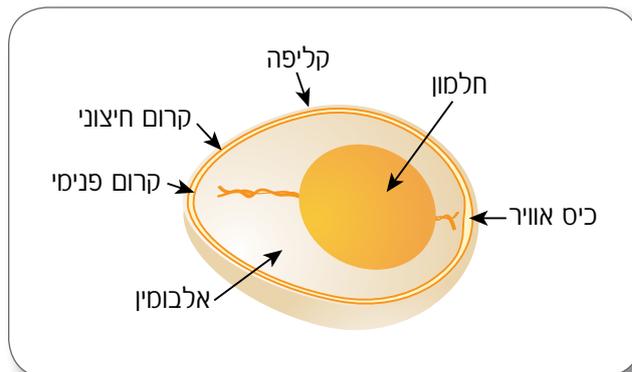
*מלכה יאיון, מורה לכימיה בבית ספר ע"ש קציר; המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

תהליך בישול החלבון ברמה המולקולרית

החלבון משתנה תוך כדי בישול. בשלב ראשון מתקבל חומר גמיש ועכור, ובישול ממושך יוצר מבנה גמיש פחות ודמוי גומי - "תרמוסטי". האלבומין עצמו גלובולרי, כלומר, המולקולות של החלבונים שמרכיבים אותו הן כדוריות כגון [אובאלבומין](#) - ovalbumin. אפשר לדמיין את החלבון של הביצה כגיל ובו מולקולות כדוריות של אלבומין המוקפות במולקולות מים, מלחים וחומרים אחרים. הן יכולות לנוע, אבל לא באופן חופשי כמו בתמיסה.

מולקולות אלו הן שרשראות ארוכות אשר יחידות המבנה שלהן הן חומצות אמינו הקשורות בקשרים פפטידיים. מולקולות ארוכות אלו מקופלות ומגולגלות, כל מולקולה בנפרד. המבנה הכדורי מיוצב על ידי קשרי ואן דר ואלס, קשרי מימן וקשרי S-S (איורים 3-4) בין חלקים שונים של השרשרת והשיירים השונים של חומצות האמינו. בעת החיסום חלקים שונים במולקולות מתחילים לנוע וכך משתנה הקונפורמציה של המולקולות. הסיידור המרחבי שלהן משתנה כי קשרים שיצרו את המבנה הכדורי נשברים והמולקולות נפרשות (עוברות דהנטורציה). אפשר לדמיין את מולקולות החלבון בדמות יחידות של ספגטי המתפתלות וזזות במים. המבנה הפרוש חושף חלקים רבים במולקולות האלבומין, חלקם הידרופיליים וחלקם הידרופוביים, שמאפשרים יצירת קשרים עם מולקולות מים ומולקולות אלבומין אחרות בצורה אקראית. כך מתקבל מבנה מולקולרי תלת-ממדי, נָפֶשֶׁת של מולקולות אשר לוכדות מולקולות מים. החומר שמתקבל צפיד. ככל שהטמפרטורה עולה זמן הבישול מתארך, כך עולה מספרן של מולקולות המים היוצאות מהמבנה, וכך מולקולות האלבומין נקשרות זו לזו במוקדים רבים יותר עד שמתקבל מבנה מוצק - גומי (איורים 5-6). החלבון הקשה אינו משנה את צורתו ואינו מושפע יותר מעליית הטמפרטורה, אלא אם נשרוף את הביצה.

מתרחשים שינויים נוספים בעת הבישול. בדומה לכלל גז, גם כיס האוויר בביצה רגיש מאוד לשינוי טמפרטורה. כאשר הטמפרטורה עולה בקצב מהיר, הנפח של הגז גדל במהירות והביצה נסדקת.



איור 2: מבנה הביצה

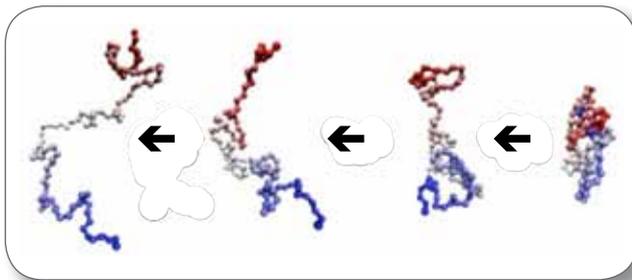
מורכבת בעיקר ממים (88%~) ומכ-40 סוגים של חלבונים המרכיבים את האלבומין (10%~). חלבונים אלו מספקים את כל 11 חומצות האמינו החיוניות. מעניין לציין שהוא אינו מכיל ויטמין C מכיוון שהאפרוח מסוגל לייצר אותו בעצמו. בטבלה הבאה מתואר ההרכב של החלבון בביצה; הרכב מפורט יותר ניתן למצוא ב- Messier, P (1991). או Powrie, W (1973).

הרכב חלבון הביצה

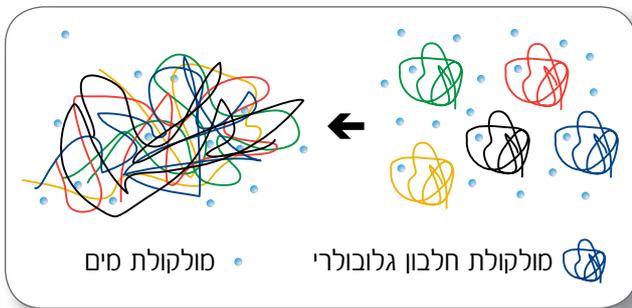
סוג החומר	הרכב באחוזים (%)
חלבונים	9.7-10.6
ליפידים	0.03
פחמימות	0.4-0.9
חומרים אחרים	0.5-0.6
מים	87.9-89.4

Powrie, W. (1973)

ביצים נועדו להיסדק כאשר האפרוח מוכן לבקוע. החורים הקטנים (pores) מאפשרים זליגה אטית של גז, למשל פד"ח שהוא תוצר של תהליכים שמתרחשים בביצה. ביצים שונות בגודלן, במספר החורים שבקליפתן וגם בגודלו של כיס האוויר שגדל ביחס הפוך לטריות הביצה.



איור 5: מודל של פרישה של מולקולת חלבון גלובולרי



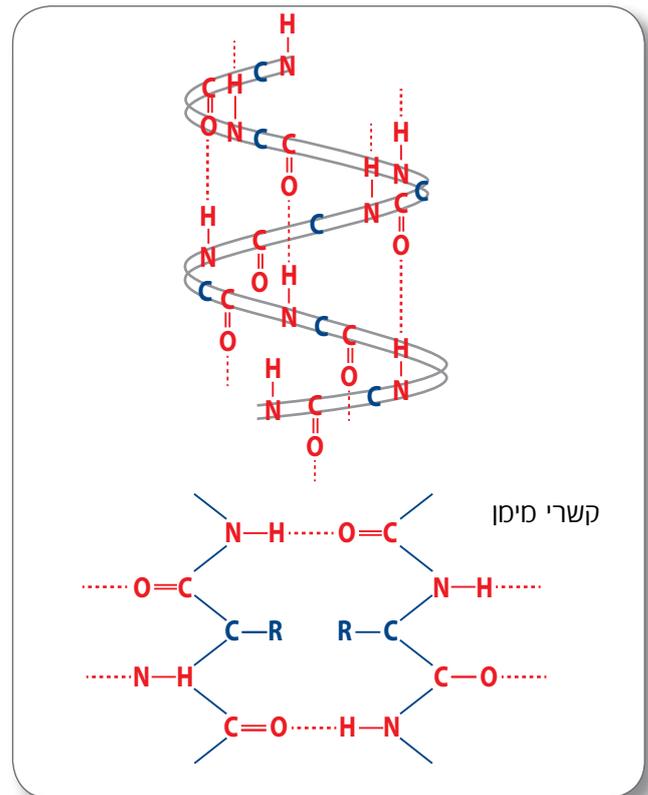
איור 6: הצבעים השונים מייצגים את המולקולות השונות של החלבון שיוצרות מבנה מולקולרי תלת-קמדי

לאחר שתארנו את הביצה ותהליך הבישול ברמה המולקולארית, אפשר להבין יותר את הסגוון הרחב של שיטות ההכנה של הביצה ולהרכיב לעצמנו מתכון שמתאים לנו במיוחד.

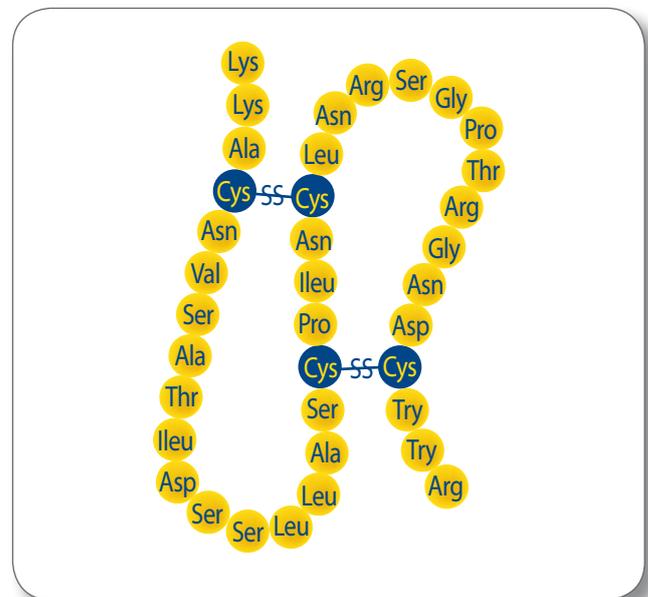
להתחיל את הבישול במים בטמפרטורת החדר או במים רותחים?

בישול במים רותחים הוא מבוקר יותר היות שהטמפרטורה ההתחלתית של המים ידועה.

אם מכניסים ביצים למים קרים, הזמן עד לרתיחה יהיה תלוי בגורמים רבים (קצב החימום, נפח המים, כמות הביצים וכו') וזמן הבישול מתארך, מולקולות האלבומין נקשרות יותר זו לזו עד שמתקבל מבנה מוצק וצמיגי דמוי גומי. הטעם של ביצה כזו שונה מאוד מביצה שבושלה זמן קצר, ומספר הקשרים בין מולקולות האלבומין אינו גדול מדי ולכוד מספר רב של מולקולות מים. החימום ההדרגתי מאפשר יציאה הדרגתית של הגז מהביצה וגם מונע "שוק תרמי" שנובע מהתפשטות מהירה



איור 3: חלק מהקשרים במולקולות האלבומין



איור 4: קשרים די-סולפידים S-S

הביצה לבין יוני ברזל שבחלמון, כך שמתקבל ברזל גפרי FeS שצבעו חום-שחור. הגז שנוצר "זורם" לכיוון הקר של הביצה וחוזר פנימה לכיוון החלמון אשר מכיל יוני ברזל. אם מקררים את הביצים במים קרים, הגז זורם החוצה במקום פנימה, וכך מונעים את היווצרות הברזל הגפרי האפור.

כיצד מקבלים צורת ביצה אובאלית וחלקה?

חירור הקליפה ויציאה של האוויר מאפשרים לחלבון הנוזלי עדיין לגלוש לאזור שהאוויר היה בו; כך מתקבלת ביצה אובאלית במקום ביצה עם צד שטוח שנוצר כאשר החלבון מתקשה לפני שהאוויר יוצא. עוד על היתרון והחיסרון של חירור הקליפה: מצד אחד, בעת הקילוף החור יכול לאפשר חדירת מים לחלל בין שתי הממברנות ובכך להקל על תהליך הקילוף. מצד שני, חירור הביצה עלול להחליש את הקליפה ולהגדיל את הסיכוי להיסדקותה.

כיצד לקלף את הקליפה?

יש שממליצים לקרר את הביצה מיד בתום הבישול כדי שנפח האוויר בין שתי הממברנות יהיה קטן מנפח החלבון והקליפה ובאופן הזה יגרום להיפרדותם. אחרים טוענים שעדיף לבשל ביצים שאיבדו מעט מטריטון, כי כיס האוויר שנמצא בין שתי הממברנות גדול, ולעתים הוא מתמלא במים ומקל על הקילוף. יש שישמרו במקרר את הביצים בקליפתן ויכניסו אותן למים חמים לפני הקילוף. גם כאן נפח האוויר בין שתי הממברנות גדול יותר מנפחם של החלבון והקליפה ובזה הוא מסייע בהיפרדותם.

כדי ללמוד שיטה מעניינת לקילוף ביצים קשות [לחצו כאן](#).

שני מתכונים "מנצחים"

לאחר ניסיונות רבים של אנשי "Science of Cooking" להלן מתכון מנצח שלהם: תחילה מניחים את הביצים בסיר מתאים. מוסיפים מים עד לגובה של כסנטימטר מעל הביצים. מחממים את המים עד לסף רתיחה, מורידים מהאש ומכסים את הסיר. משאירים את הביצים במים החמים למשך 25 דקות ולאחר מכן מצננים באמבט מי קרח.

המתכון המנצח של עיתון Chemmatters: מחוררים את הביצה בקצה השטוח יותר. מניחים את הביצים בסיר מתאים. מוסיפים

של חלק מהחומר בקליפה בדומה לשבירת כוס זכוכית כאשר שופכים מים חמים על כוס קרה.

כיצד מונעים את היסדקות הקליפה?

ככל שהפרש בין טמפרטורת הביצה והמים יהיה גדול יותר, כך נפח הגז בביצה ישתנה מהר יותר, כך יימנע מעבר של הגז דרך החורים הקטנים, והסיכוי להיסדקות יגדל.

על מנת למנוע את היסדקותה של הקליפה בעת הבישול, אפשר ליצור חור בקצה הרחב של הקליפה, וכך בעת החימום יתאפשר שחרור מהיר יותר של אוויר ובכמות גדולה יותר. מוטב לדאוג שהביצה והמים שבהם היא מתבשלת יהיו בטמפרטורת החדר.

במיקרוגל, שינוי הטמפרטורה מהיר מאוד, זו הסיבה שבגללה מוטב להימנע מבישול ביצה קשה בקליפתה במיקרוגל ולהעדיף בישול [במתקן המיועד לכך](#).

מדוע מוסיפים מלח או חומץ?

ברור שהסיבה אינה קשורה לטעם - מלחים אינם חודרים לקליפה בבישול של 10 דקות - וגם לא להעלאת טמפרטורת הרתיחה של המים, כי ההבדל בטמפרטורה בנוכחות מלח וחומץ או בהיעדרם הוא זעום. מלח מזרז את תהליך הדנטורציה של האלבומין; מולקולות החלבון משנות את הקונפורמציה שלהם בהתאם למסס שבו הן נמצאות הודות לאינטראקציות אחרות שנוצרות. במקרה של היסדקות הקליפה מולקולות האלבומין שיפגישו את המים המלוחים תעבורנה דנטורציה במהירות, יתקבל חלבון "מוצק" שיסתום את הסדק הקטן שנוצר, וכך הקליפה תאטם שוב. אותה תופעה מתרחשת בנוכחות חומץ, שהרי שינוי ב-pH משפיע מאוד על המטען של שיירי חומצות האמינו בחלבון, ועקב כך המבנה המרחבי של מולקולת החלבון משתנה. הוספת מלח או חומץ ימנעו היווצרות של חוטי חלבון שלפעמים יוצאים מבעד לסדקים או לחורים בקליפה.

מדוע לפעמים צבע החלמון אפור?

בבישול ממושך צבע החלמון הופך בהדרגה מצהוב לאפור. הקרום האפור סביב החלמון נוצר מתגובה בין הגז מימן גפרי H₂S הנוצר מפירוק של חומצת האמינו ציסטאין בחלבון

מה עשיתי	תצפיות

א. טיגון ביצה ללא שמן במחבת טפלון

- « צפו בכל אחד מהשלבים (היעזרו בכל החושים).
- « חממו את המחבת במשך דקה.
- « רשמו את זמן ההתחלה.
- « הוסיפו את הביצה למחבת המחוממת (רצוי לצלם את הביצה).
- « כסו את המחבת בעזרת מכסה הזכוכית.
- « רשמו את תצפיותיכם. יש לרשום לפחות חמש תצפיות.
- « כאשר החלבון והחלמון מוכנים כבו את הלהבה ורשמו את הזמן (רצוי לצלם את הביצה).

ב. טיגון ביצה בשמן במחבת טפלון

- « צפו בכל אחד מהשלבים (היעזרו בכל החושים).
- « חממו את אותה מחבת (שמכילה הפעם כף שמן) במשך דקה, באותה עוצמת להבה.
- « רשמו את זמן ההתחלה.
- « הוסיפו את הביצה למחבת המחוממת (רצוי לצלם את הביצה).
- « כסו את המחבת בעזרת מכסה הזכוכית.
- « רשמו את תצפיותיכם. יש לרשום לפחות חמש תצפיות.
- « כאשר החלבון והחלמון מוכנים כבו את הלהבה ורשמו את הזמן (רצוי לצלם את הביצה).
- « רשמו לפחות 5 שאלות שעולות במהלך הניסוי ולאחריו.

מים בכמות הדרושה לכיסוי הביצים. מוסיפים מלח. מחממים את הסיר עד שהמים רותחים, מנמיכים את עוצמת הלהבה עד שהמים רותחים מעט, מודדים 3 דקות לקבלת ביצה רכה (שאכילתה מנוגדת להמלצות של משרד הבריאות) או 10 דקי לבישול ביצה קשה. מורידים מהאש ומקררים מיד במים קרים עד לקבלת טמפרטורה שמאפשרת לגעת בביצים ולקלפן.

ההבדל העיקרי בין ביצה קשה ובין ביצים אחרות כדוגמת ביצה עין, חביתה וכי נובע מהעובדה שאלה האחרונות אינן נושאות קליפה, והן מתבשלות בכלי פתוח המאפשר אידי של מי הביצה והיווצרות תגובה בין הביצה לשמן (תהליך מיאוד). לא נפרט על הכימיה שמאחורי בישול זה; במקום זה נציע ניסוי חקר שיייע בגילוי התהליך יחד עם התלמידים.

ניסוי

כימיה לארוחת בוקר – ניסוי ברמת בסיס

הוראות כלליות

- « קראו היטב את כל ההנחיות לפני תחילת ביצוע הניסוי.
- « ודאו שנמצאים ברשותכם פרטי הציוד והחומרים הנחוצים לביצוע הניסוי.
- « שימוש בשפה מדעית נכונה ומדויקת לכל אורך התהליך.
- « דיווח ברור ומאורגן; דוח אחד ייסר לבדיקה על ידי הקבוצה.

ציוד וחומרים

גזיה, מחבת טפלון $-(CF_2CF_2)_n-$, מכסה זכוכית, שמן, 2 ביצים לא מבושלות, ספטולה, גפרורים.

מהלך הניסוי

הקפידו על ביצוע ההנחיות האלה: מילוי מדויק אחר ההנחיות לביצוע שלב א' ואיסוף תצפיות רבות ככל האפשר. (את התצפיות רצוי לרשום כרשימה. ההנחיה איננה לרשום את מהלך הניסוי, אלא את מה שרואים, חשים (שינוי טמפרטורה למשל, מריחים וכי). אם קשה לעשות את הפרדה, אפשר לארגן את התצפיות בטבלה הבאה:

בשל זיהומים מסוגים שונים, ביניהם חיידקי סלמונלה. הרתחת הביצה במים רותחים במשך 10 דקות לפחות וטיגון הביצה משני צדיה במשך למעלה מ-5 דקות מבטיחים מוצר בטוח. חשוב שהחלבון והחלמון יהיו קרושים. מתוך [הנחיות לרכישת בשר עוף וביצים](#) ולטיפול בהם שגובשו ע"י צוות מקצועי משותף למשרד הבריאות ומשרד החקלאות

מידע נוסף על בישול של ביצים והכימיה שמעורבת בתהליך, ניתן למצוא באתרים ובמקורות הבאים:

[Grosser, Arthur E. Egg Cookery, Chemmatters, 1984, December, 4-8.LICK](#)

[Messier, P. \(1991\). Protein chemistry of albumen photographs. Topics in Photographic Preservation, 4, 124-135.](#)

[Powrie, W. \(1973\). Chemistry of eggs and egg products. in Egg Science and Technology, W. Stadelman and O. Cotterill. Westport, Connecticut: AVI Publishing Co. 61.-90.](#)

[Stadelman, William J.; Cotterill, Owen J. Egg Science and Technology, 2nd ed.; AVI Publishing Company: Westport, Conn., 1977.](#)

[P.E.Stein et al. \(1991\). Crystal structure of uncleaved ovalbumin at 1.95 A resolution.. J Mol Biol, 221, 941-959. PMID 1942038 \[DOI: 10.1016/0022-28\].](#)

<http://www.exploratorium.edu/cooking/eggs/index.html>

http://simplyrecipes.com/recipes/how_to_make_perfect_hard_boiled_eggs/

<http://www.youtube.com/watch?v=xLWCqZIP3us&feature=related>

http://www.snunit.k12.il/heb_journals/chimia/68029.html

ניתוח התוצאות והסקת המסקנות

- « על סמך התצפיות שערכתם השוו בין התופעות, קבעו קריטריונים רבים ככל האפשר להשוואה.
- « נסו להציע הסבר להבדלים שקבעתם בסעיף הקודם.
- « הסיקו מסקנות מטבלת ההשוואה שערכתם.

שאלות ליישום הרקע המדעי

- « מדוע לדעתכם הביצה, המורכבת בעיקר ממים, אינה נדבקת לטפולן שעשוי ממולקולות ארוכות בעלות יחידה חוזרת של $-CF_2CF_2-$?
- « האם הקשרים הבינומולקולריים בביצה המבושלת חזקים או חלשים מאלו שבביצה הלא מבושלת? קבעו והסבירו במונחים של מבנה וקישור.
- « מדוע מוסיפים שמן לפני טיגון הביצה?

מעניין לדעת

- « מקור המונח "אובאלי" במילה *ovum* - ביצה בלטינית.
- « ביצים לא טריות צפות במים כי יש בהן כיס אוויר גדול יחסית.
- « ניתן להבדיל בין ביצה קשה לביצה לא מבושלת ע"י סיבובן סביב צירן. ביצה לא מבושלת תסתובב כשהיא עולה ויורדת.
- « [קיים מתקן](#) שעוזר לדעת את מידת הבישול של הביצה הקשה. הוא עשוי מגביש נוזלי שמשנה את צבעו בהתאם לטמפרטורה, ממש כמו החלבון של הביצה. מניחים אותו בסיר הבישול יחד עם הביצים ועוקבים אחרי השינוי בצבעו, שמתרחש מהחלק החיצוני פנימה ותואם את השינוי של הביצה.
- « קיים מתקן חדש לבישול ביצה קשה במיקרוגל



[Making Hard Boiled Eggs In The Microwave Oven](#)

- « המלצת משרד הבריאות היא שיש לבשל את הביצים היטב