



תסיסה: הכלי הביוטכנולוגי העתיק ביותר של האנושות

Iasmin Cartaxo Taveira^{1*}, Karoline Maria Vieira Nogueira¹, Débora Lemos Gadelha de Oliveira² | Roberto do Nascimento Silva¹

¹המעבדה לביוטכנולוגיה מולקולרית, המחלקה לביוכימיה ולאיימנולוגיה, בית הספר לרפואה של ריבייראו פרטו (FMRP), אוניברסיטת סאו פאולו, ריבייראו פרטו, ברזיל

²המחלקה להנדסה ביולוגית, אוניברסיטת מינהו, בראגה, פורטוגל

סוקרים צעירים

IIS J. C. MAXWELL
גיל: 16-17

OLIVER
גיל: 10

תסיסה היא תהליך שבמסגרתו מיקרואורגניזמים ממירים סוכרים לתוצרים חדשים באמצעות תגובות כימיות. מאז ימי קדם, בני אדם הפיקו תועלת מתהליך התסיסה הטבעי כדי לפתח תוצרים רבים, בכללם מאכלים, תרופות ודלקים. במאמר זה אנו בוחנים את ההיסטוריה של תהליך התסיסה, ומדגימים מדוע תהליך טבעי זה הוא הכלי הביוטכנולוגי הקדום ביותר של האנושות. המאמר יסייע לכם להבין מהם סוגי התסיסה השונים, ומהם השימושים העדכניים של תהליך התסיסה.

חשיבות התסיסה עבור הציביליזציה האנושית

תסיסה היא תהליך טבעי שבמהלכו סוכרים מומרים לתוצרים שיכולים לשמש בני אדם. ההיסטוריה של התסיסה מתחילה בשנת 10,000 לפני הספירה, כאשר הציביליזציה האנושית הראשונה התפתחה באזור אשר מכונה 'הספר הפורה' (המזרח התיכון של ימינו). אומנם לאנשים בתקופה ההיא לא היה הידע המדעי המצוי בידינו כיום, אך הם בכל זאת

הצליחו לבחון את העולם ולפתח טכנולוגיה. המדען האמריקאי המפורסם קרל סייגן אמר פעם שכל ילד מתחיל את חייו כמדען מטבועו. כלומר, כולם יכולים לפתח כלים שעשויים לשפר את חייהם של בני האנוש! האין זה מדהים? בני האדם הקדומים הוכיחו כי טענה זו נכונה בכך שפיתחו את אחד הכלים הביולוגיים החשובים ביותר: תסיסה.

מאז הזמנים הקדומים הללו, תסיסה שימשה בעיקר כשיטה לשימור מזון. משנת 5,000 לפני הספירה בערך, בני העם השומרי והמצרים השתמשו בתסיסה כדי לייצר מוצרי מזון רבים, כמו לחם, יין ובירה. הם לא ידעו להסביר איך המזונות הללו נוצרים בדיוק, או למה התסיסה מתרחשת. לכן, הם לרוב סברו כי תסיסה היא נס שניתן להם על ידי האלים שלהם. האם תוכלו לדמיין עולם שבו ההסברים כה מעטים? במאה ה-19, המדען הצרפתי לואי פסקר הציע תיאוריה שלפיה תסיסה מתרחשת הודות לנוכחות של **מיקרואורגניזמים**. אלה הם תאים חיים זעירים שלא ניתן לראותם ללא מיקרוסקופ, הכוללים חיידקים ושמרים. פסטר גילה גם כי חיידקים שונים מבצעים סוגי תסיסה שונים שבאמצעותם ניתן להגיע למגוון תוצרים סופיים, כפי שנראה בחלקו השלישי של המאמר.

השימוש בתסיסה הוא אחד הגורמים העיקריים שתרמו להתפתחות האנושות. למעשה, ניתן לומר כי זהו השימוש הראשון ב**ביוטכנולוגיה**. ביוטכנולוגיה עושה שימוש במערכות חיות, או באורגניזמים חיים, במטרה לפתח טכנולוגיה. תהליך התסיסה מלמד אותנו כי מיקרואורגניזמים יכולים להוות משאב ביוטכנולוגי נפלא. כיום, תסיסה היא עדיין כלי חיוני עבור תעשיות רבות שתומכות בחברה האנושית, בדיוק כפי שהייתה בשנת 10,000 לפני הספירה! בעקבות הגידול באוכלוסיית העולם ישנה כיום דרישה גבוהה יותר למזון, וכדי לספק דרישה חדשה זו, משתמשים בתסיסה בקנה מידה רחב הרבה יותר. מאז ראשית פיתוחה ועד היום, טכנולוגיית התסיסה התקדמה מאוד, והייתה לחלק חשוב ביותר בשרשרת המזון העולמית [1].

כיצד תסיסה מתרחשת?

האם אי פעם תהיתם מהי נשימה? זו הדרך שבה תאי הגוף משיגים אנרגיה כדי להישאר בחיים, על ידי שימוש בחמצן (O_2). קשה לחשוב על חיים ללא נשימה, אולם זה המצב עבור סוגים שונים של יצורים קטנים! מיקרואורגניזמים רבים מסוגלים לגדול ולחיות בלי לצרוך חמצן, הודות לתהליך התסיסה, שבמסגרתו נעשה שימוש בסוכרים כדי לייצר אנרגיה עבור תאים חיים. פרט לכך, אנרגיה זו מיוצרת ללא צורך בחמצן, מאחר שהתהליך מתרחש ב**נתיבים אנאירוביים**. לכן, הוא מייצג דרך חלופית להשגת אנרגיה! מיקרואורגניזמים מתסיסים ותוצרי הלוואי שלהם מגדירים את סוג התסיסה. ישנם שני סוגי תסיסה עיקריים, המכונים **תסיסה הומולקטית ותסיסה פקלית (איור 1) [2]**. שניהם חיוניים למטרות רבות המשרתות את האנושות. לכן, חשוב מאוד שנבין את תהליכי התסיסה הללו, במטרה לשפר את תהליך הייצור של תוצרים יקרי-ערך רבים [3].

תסיסה הומולקטית מתחילה בסוכר שנקרא לקטוז (איור 1A). ישנם מיקרואורגניזמים, הידועים כחיידקי חומצה לקטית, אשר משתמשים בלקטוז כדי להשיג אנרגיה. תסיסה של מולקולת לקטוז אחת מייצרת שתי מולקולות חומצה לקטית; שתי מולקולות **אדנוזין תלת-זרחתי (ATP – מקור האנרגיה השימושי ביותר לכל היצורים החיים)**, ושתי

מיקרואורגניזמים (Microorganisms)

אורגניזמים שלא ניתן לראותם ללא מיקרוסקופ.

ביוטכנולוגיה (Biotechnology)

המדע ליצירת תוצרים חדשים או מותאמים, בעזרת יצורים חיים.

נתיב אנאירובי (Anaerobic Pathway)

תגובות ביוכימיות שאינן מצריכות הימצאות חמצן.

תסיסה הומולקטית (Lactic Acid Fermentation)

התהליך הביולוגי של הקמת סוכר ללקטוז ולאנרגיה תאית בדמות אדנוזין תלת-זרחתי (ATP).

תסיסה פקלית (Alcoholic Fermentation)

התהליך הביולוגי של הקמת סוכר לאתנול ולאנרגיה תאית בדמות אדנוזין תלת-זרחתי (ATP).

אדנוזין תלת-זרחתי (Adenosine Triphosphate – ATP)

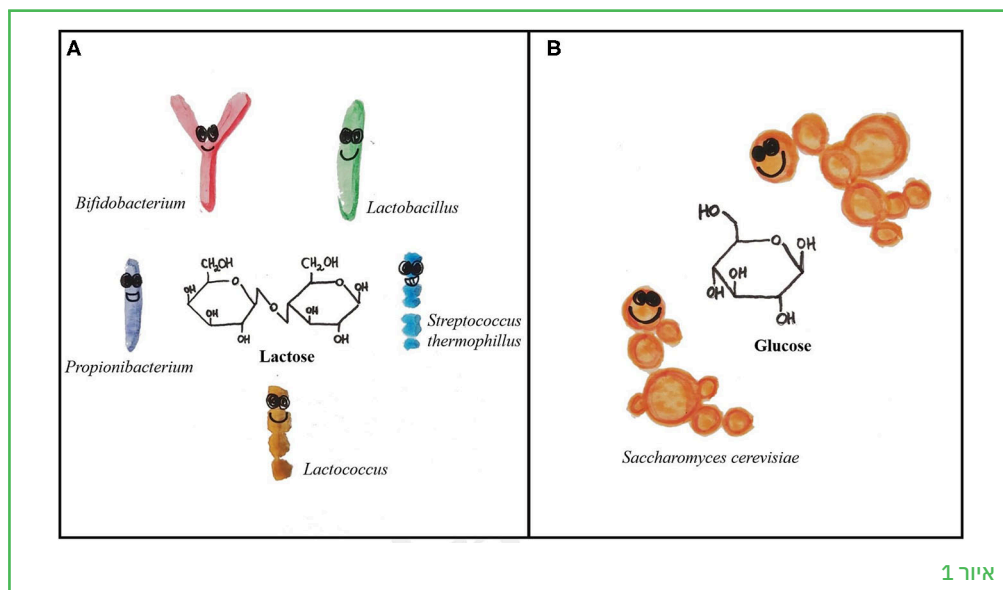
סוג של תרכובת אורגנית המספקת את האנרגיה העיקרית שבה משתמשים יצורים חיים.

איור 1

שני סוגי התסיסה הקיימים. (A) בתסיסה הומולקטית, שבמהלכה מתפרק סוכר בשם 'לקטוז' (Lactose), משמשים מגוון מיקרואורגניזמים. (B) בתסיסה כהלית, המתחילה בסוכר שנקרא 'גלוקוז' (Glucose), נהוג להשתמש בשמרים. מקרא מלמעלה בכיוון השעון: A. *Bifidobacterium* = *Bifidobacterium* ביפידובקטריום – סוג של חיידקים 'ידידותיים' (*Lactobacillus*) = *Lactobacillus* לקטובצילוס – משפחה של חיידקים 'ידידותיים' (*Streptococcus thermophilus*) = *Streptococcus thermophilus* סטרפטוקוקוס תרמופילוס – סוג של חיידקים המשתייכים לממלכת החיידקים האמיתיים *Lactococcus* = לקטוקוקוס – חיידקים המשתייכים לקבוצת חיידקי החומצה הלקטית = *Propionibacterium* פרופיוניבקטריום – חיידקים גראם-חיוביים, *B. Saccharomyces cerevisiae* = שֶׁמֶר האפיייה – פטרייה המסייעת בתהליך התפחת מזון.

אתנול (Ethanol)

סוג האלכוהול הנפוץ ביותר בחיינו.



איור 1

מולקולות מים. תעשיות שונות משתמשות בדרך כלל בזן של חיידקים שנקרא לקטובצילוס (*Lactobacillus*) עבור תהליך התסיסה ההומולקטית. האם אתם זוכרים שאמרנו כי בני האדם הקדמונים השתמשו בתסיסה כדי לְשַׁמֵּר מזון? כיום אנו יודעים שהדבר מתאפשר הודות לייצור של חומצה לקטית, אשר עוצרת גדילת מיקרואורגניזמים אחרים ומונעת מחיידקים בלתי רצויים להרקיב את המזון.

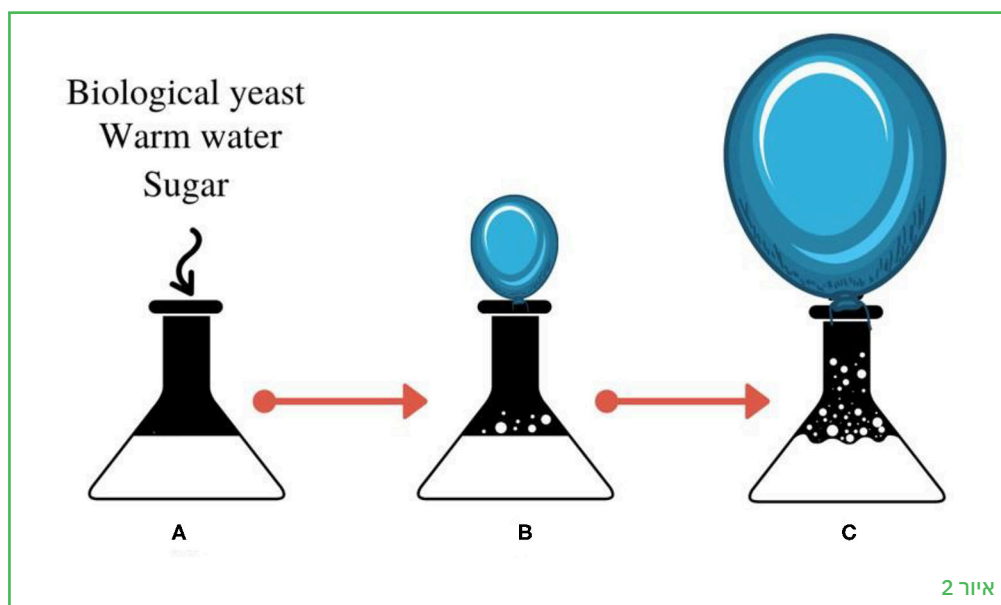
שמרים, פטריות וסוגי חיידקים מסוימים משתמשים בסוכר שנקרא גלוקוז בתהליך התסיסה הכהלית (איור 1B). תסיסת מולקולת גלוקוז אחת מייצרת שתי מולקולות אֶדְנֹזִין תלת-זרחתי (ATP); שתי מולקולות אלכוהול המכונה אֶתְנֹל; שתי מולקולות פחמן דו-חמצני ושתי מולקולות מים. המיקרואורגניזם הנפוץ ביותר שמצוי בשימוש על ידי תעשיות שונות עבור תסיסה כהלית הוא שֶׁמֶר האפיייה (*Saccharomyces cerevisiae*). הנה עובדה מעניינת לגבי תסיסה כהלית – ייצור גז הפחמן הדו-חמצני בתהליך תסיסה זה הוא שהקנה לתהליך את שמו. מקור המילה תסיסה (באנגלית: 'fermentation'), הוא במילה הלטינית 'fervere', שמשמעותה 'הִרְפָּתָה'. בועיות הפחמן הדו-חמצני המיוצרות בתהליך התסיסה גורמות לנוזל להיראות כאילו הוא רותח. תוכלו לִצְפּוֹת בבית בהתרחשות התסיסה, באמצעות הניסוי הפשוט המתואר באיור 2.

שימושים ביוטכנולוגיים של תסיסה

האם אתם ערים לכך שתסיסה נמצאת בכל מקום (איור 3)? הודות לתהליך הביוטכנולוגי העתיק הזה, אנו יכולים לאכול לחם אוורירי או יוגורט טעים. לתסיסה שימושים רבים הקשורים במזון. אולי שמעתם על קֶפִיר, שהוא משקה חלב חמוץ אשר נוצר על ידי תסיסה של חלב. לצורך הכנתו משתמשים בסוגים מסוימים של מיקרואורגניזמים, המפיקים תוצר במרקם קֶרְמִי שדומה ליוגורט. נפוץ מאוד גם להתסיס ירקות, כמו כרוב, שממנו מכינים כרוב כבוש וקימצ'י (מאכל קוריאני המורכב מירקות שונים אשר עוברים כבישה ותסיסה עם מגוון תבלינים). כך ניתן לייצר טעמים מדהימים חדשים. לבסוף, תסיסה היא אחד השלבים הבסיסיים בתהליך הייצור של גבינה – מוצר מזון שאנשים רבים אוהבים [4].

איור 2

ניסוי פשוט המאפשר צפייה בבית בתהליך התסיסה. (A) ערֶבְבוּ מים חמימים, שמרים וסוכר בצנצנת או בבקבוקון שצווארו צר. (B) הניחו בלון על פִּית הבקבוקון. (C) לאחר כמה דקות, אתם אמורים לראות שהבלון מתנפח בשל היווצרות גז פחמן דו-חמצני, עֶקֶב התססת הסוכר על ידי השמרים.

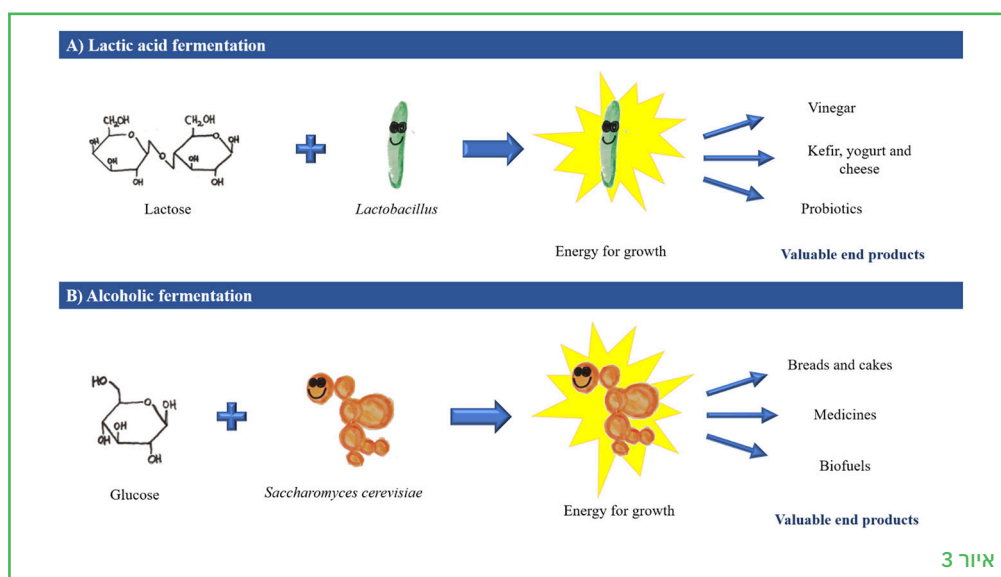


איור 2

איור 3

תרשים כללי של

סוגי תסיסה. (A) בתסיסה הומולקטית, חיידקים כמו לקטובצילוס ממירים את הסוכר לקטוז לתוצרים סופיים שימושיים (Valuable end products), כמו חומצה אֶצְטִית (חומץ); מוצרי חלב מותססים (קפיר, יוגורט וגבינה), ופרוביוטיקה. (B) בתסיסה כהלית, שמר האפייה ממיר את הסוכר גלוקוז באופן המאפשר ייצור תוצרים כמו לחם, תרופות ודלקים ביולוגיים. = Energy for growth אנרגיה הנדרשת לגדילה.



איור 3

פרוביוטיקה
(Probiotic)

בדרך כלל זהו מוצר חלבי או תוסף תזונה, המכיל מיקרואורגניזמים. אלה מחליפים חיידק חיוני שבדרך כלל נמצא במערכת העיכול שלנו, או מתוספים אליו.

פתוגן
(Pathogen)

גורם מחולל מחלה, כמו טפיל או חיידק.

ישנן שלוש סיבות עיקריות לכך שתסיסה היא מרכיב חשוב בתהליך ייצור מזון: היבטים של הֶמְרַת חומרים; ענייני בריאות וחיוניות הנאה דרך בלוטות הטעם שלנו. כשמדברים על המרת חומרים, הכוונה היא לכך שאנו הופכים חומרים כמו קמח, למשל, למוצר שאנשים מעוניינים בו, כמו לחם. לו אופה היה מנסה להכין לחם ללא שמרים, התוצר הסופי היה קשה וכבד, ולא אוורירי כפי שאנו מצפים מלחם להיות. גז הפחמן הדו-חמצני אשר מיוצר בתהליך התסיסה מהותי ליצירת מרקמו של הלחם והטעם המאפיין אותו. האם אי פעם חשבתם על האפשרות שמיקרואורגניזמים מסוימים עשויים לשפר את בריאותנו? ובכן, פְּרֹבִּיּוֹטִיקָה היא מוצר שיכול לעשות זאת. פרוביוטיקה מכילה מיקרואורגניזמים המסוגלים לשפר את בריאות מערכת העיכול האנושית ואת הרווחה הגופנית. על ידי התססת המזון במעיים שלנו, חיידקים ידידותיים אלה יכולים להתרבות ולבלום את גדילתם של פְּתוֹגְנִים, וכך לשמור על בריאות מערכת העיכול בגוף האדם. תסיסה גם יכולה להסב לנו עונג דרך

בלוטות הטעם, משום שבתהליך זה נוצרים טעמים חדשים ומורכבים, כמו אלה המאפיינים גבינה ויוגורט [5].

נוסף על שימושיו בתעשיית המזון, לתהליך התסיסה יישומים ביוטכנולוגיים רבים נוספים. מדענים משתמשים בתסיסה כדי לייצר תרופות מסוימות שאנו נוטלים כשאנו חולים, שיכולות להשמיד חיידקים ונגיפים מזיקים, או לעצור את גדילתם (סוגים שונים של אנטיביוטיקה ותכשירים אנטי-ויראליים). לדוגמה, במהלך תהליך התסיסה, פטרייה מסוג פֶּנִּיצִילִיּוּם (*Penicillium*) ייצרה את אחד מסוגי האנטיביוטיקה הראשונים שהתגלו, הפֶּנִּיצִילִין. אנטיביוטיקה זו הצילה חיי אלפים רבים של אנשים [6].

האם תוכלו לדמיין שימוש במיקרואורגניזמים לייצור דלקים? כשאנשים משתמשים באֶתָנול במכוניותיהם, הם נהנים מיתרון נוסף שמציעה תסיסה מיקרוביאלית. דלק אתנול הוא **דלק ביולוגי**. זו חלופה לבנזין אשר נחשבת כמקור לאנרגיה מתחדשת. כלומר, ניתן לְחַדֵּשׁ את המלאי במהירות וללא גבול, בלי שנצטרך לקדוח באדמה כדי לשאוב נפט. אתנול ניתן לייצר ממגוון רחב של צמחים, כמו תירס, קֶנֶה סוכר או סֶלֶק הסוכר. זאת משום שהצמחים הללו מכילים סוכרים המשמשים מינים מסוימים של שמרים וחיידקים להֶפְקֵת אנרגיה. כשהמיקרואורגניזמים מפרקים את הסוכרים הללו בסביבה שיש בה רמות חמצן נמוכות, הסוכרים מומרים לאתנול בתהליך התסיסה [7].

תסיסה: הפיצו את הבשורה!

במאמר זה למדתם מהי תסיסה, ולגבי החשיבות של כלי ביוטכנולוגי זה לאורך התפתחות האנושות. למדתם גם על אודות כמה מוצרים חשובים המיוצרים בעזרת תסיסה או שיוצרו באמצעותה בעבר, בחברות עתיקות ומודרניות כאחד. בפעם הבאה שתראו מוצר שיוצר בעזרת תסיסה, או תשתמשו בו, שתפו מידע זה עם בני המשפחה שלכם ועם חבריכם, כדי שגם הם יוכלו להעריך את מגוון השימושים הרחב של הכלי הביוטכנולוגי העתיק ביותר של האנושות!

מקורות

1. Paul Ross, R., Morgan, S., and Hill, C. 2002. Preservation and fermentation: past, present and future. *Int. J. Food Microbiol.* 79:3–16. doi: 10.1016/S0168-1605(02)00174-5
2. Nelson, D. L., and Cox, M. M. 2013. *Lehninger Principles of Biochemistry*. 6th ed. New York, NY: W. H. Freeman and Company.
3. Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., B, et al. 2017. Health benefits of fermented foods: microbiota and beyond. *Curr. Opin. Biotechnol.* 44:94–102. doi: 10.1016/j.copbio.2016.11.010
4. Sanlier, N., B. B., and Sezgin, A. C. 2019. Health benefits of fermented foods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59:506–27. doi: 10.1080/10408398.2017.1383355
5. Zhao, C. J., Schieber, A., and Gänzle, M. G. 2016. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations – a review. *Food Res. Int.* 89:39–47. doi: 10.1016/j.foodres.2016.08.042

דלק ביולוגי (Biofuel)

סוג של דלק שעשוי מחומר חי, או שהיה חי בעבר, כמו חומר צמחי, ושיכול לשמש כתחליף עבור דלקים מבוססי-נפט, כמו בנזין.

6. Rahman, M. 2013. Medical applications of fermentation technology. *Adv. Mater. Res.* 810:127–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.810.127
7. Sebayang, A. H., Masjuki, H. H., Ong, H. C., Dharma, S., Silitonga, A. S., Mahlia, T. M. I., et al. 2016. A perspective on bioethanol production from biomass as alternative fuel for spark ignition engine. *RSC Adv.* 6:14964–92. doi: 10.1039/C5RA24983J

פורסם אונליין: 05 בנובמבר 2024

נערך על ידי: Dominik K. Großkinsky

מנחים מדעיים: Marta Dell'Orto | Francesca Paradisi

ציטוט: Taveira IC, Nogueira K MV, Oliveira DLGd | Silva RdN (2024) תסיסה: הכלי הביוטכנולוגי העתיק ביותר של האנושות. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.568656-he

תורגם והותאם מ: Taveira IC, Nogueira K MV, Oliveira DLGd and Silva RdN (2021) Fermentation: Humanity's Oldest Biotechnological Tool. *Front. Young Minds* 9:568656. doi: 10.3389/frym.2021.568656

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדר כי קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © Taveira, Nogueira, Oliveira | Silva 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

IIS J. C. MAXWELL, גיל: 16–17

אנו קבוצה המונה 22 בני נוער איטלקיים בגילי 16-17, אשר לומדים בתיכון מדעי במילאנו. זו הפעם הראשונה שסקרנו מאמר מדעי. נשמח לעשות זאת שוב בעתיד, כי אנו מתעניינים מאוד במדע, הודות למורה החדשה שלנו. אנו גם שמחים על ההזדמנות לאתגר את עצמנו בהבנת תוכן שאינו כתוב בשפת האם שלנו.

OLIVER, גיל: 10

אוליבר אוהב מדע, וסקרן מאוד. כיוון שהתגורר בארצות שונות (אירלנד, אנגליה, וכיום בשווייץ), הוא דובר ארבע שפות באופן שוטף, ורוצה להמשיך לטייל ברחבי העולם כשהיה גדול יותר.



הכותבים



IASMIN CARTAXO TAVEIRA

אני ביוטכנולוגית, וכיום, סטודנטית לתואר שני בתחום הביוכימיה בבית הספר לרפואה של ריבייראו פֶּרְטוֹ (FMRP), באוניברסיטת סאו פאולו. יש לי ניסיון בשימוש בחיידקים, שמרים ופטרייות לפיתוח אסטרטגיות ביוטכנולוגיות המיועדות לפיתוח בר-קיימה. *iasmin.cartaxo@gmail.com



KAROLINE MARIA VIEIRA NOGUEIRA

אני ביוכימאית העובדת כיום כפוסט-דוקטורנטית באוניברסיטת סאו פאולו שבברזיל. המחקר שלי מתמקד בפיתוח מפעלים של תאי שמרים, היכולים להשתמש בסוכרים שונים מביומסה צמחית כדי לשפר ייצור של אתנול.



DÉBORA LEMOS GADELHA DE OLIVEIRA

אני תלמידת תואר שני למדעי המזון ולטכנולוגיית מזון באוניברסיטת מינהו שבפורטוגל. ההתמחויות העיקריות שלי הן בבטיחות מזון; חדשנות בתחום הייצור ואנליזה חושית.



ROBERTO DO NASCIMENTO SILVA

אני פרופסור עמית לביוכימיה ולביוטכנולוגיה במחלקה לביוכימיה ולאיימונולוגיה בבית הספר לרפואה של ריבייראו פֶּרְטוֹ (FMRP), באוניברסיטת סאו פאולו. תחומי העניין המחקרי שלי מגוונים. אני משתמש בגישות ביוטכנולוגיות כדי לשפר ייצור של דלקים ביולוגיים ושל תוצרים בעלי ערך מוסף מביומסה צמחית.

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK