



חידקים אוהבי-קור השורדים בקרח

Kristy Yi Wen Chang^{1*†}, Frederick Reinhart Tanoto^{1*†} | Adriana Lopes dos Santos^{2*}

¹מרכז סינגפור להנדסת מדעי החיים הסביבתיים, האוניברסיטה הטכנולוגית של נאניאנג, סינגפור, סינגפור

²בית הספר האקס'יאני לסביבה, האוניברסיטה הטכנולוגית של נאניאנג, סינגפור, סינגפור

סוקרים צעירים

SOPHIE

גיל: 12



SPROUTS
MONTESSORI

גיל: 7-10



קריוספירה (Cryosphere)

מקומות על פני כדור הארץ
שבהם המים קפואים,
בתצורת קרח או שלג.

האם ידעתם שעל פני כדור הארץ יש מקומות שקפואים כל השנה? האם תוכלו לדמיין חיים שלמים בקור המקפיא של השלג והקרח? ובכן, ישנם מיקרואורגניזמים זעירים שחיים בנוחות בקור. יתרה מכך, סוגים רבים של חידקים קבעו את ביתם בסביבה הקיצונית הזו! כפי שדוב הקוטב זקוק לפרוה עבה כדי לשרוד בחורף, לחיידקים הללו יש דרכים משלהם לחיות בנוחות בסביבה קשה זו. מדענים גילו כי ניתן ללמוד מאותם חידקים דברים רבים על אודות החיים במערכת השמש, ונמצא כי הם מועילים מאוד במגוון תעשיות.

הישרדות במקומות הקרים ביותר על פני כדור הארץ

האם ידעתם שכדור הארץ הוא כוכב לכת די קפוא? למעשה, כמחצית מסביבות המחיה על אדמת כדור הארץ מכוסות בשלג או בקרח – באופן עונתי, או באופן קבוע! בִּרְרֵר!!! מהקוטב הצפוני ועד לקוטב הדרומי, מפסגות הרים מושלגות ועד קרחונים שצפים בים, ישנן סביבות מחיה קרות בכל מקום, והן מרכיבות את החלק הקפוא של כדור הארץ, שנקרא קְרִיּוֹסְפֶּרָה (איור 1) [1].

איור 1

מגוון הצורות שבהן שלג
וקרח מרכיבים את
הקריוספירה של כדור הארץ
(האיור נוצר

בעזרת [BioRender.com](https://www.biorender.com)).

מקרא:

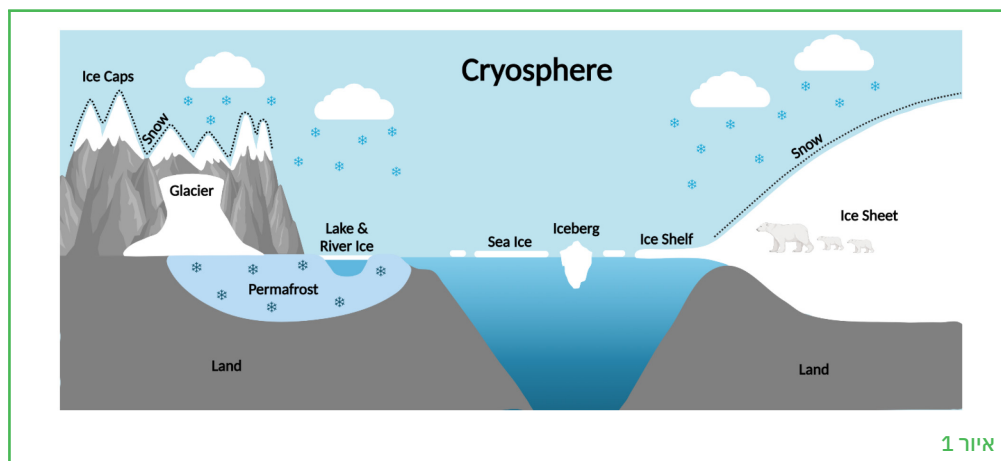
Cryosphere = קריוספירה;
Ice Caps = פסגות מושלגות;
Snow = שלג;
Glacier = קרחון יבשתי;
Permafrost = קיפאון-עד;
Lake & River Ice = קרח
אגמים ונהרות;
Sea Ice = קרח ים;
Iceberg = קרחון ימי;
Ice Shelf = מדף קרח;
Ice Sheet = יריעת קרח;
Land = אדמה.

מיקרואורגניזמים (Microbes)

יצורים חיים זעירים שניתן
לראות רק באמצעות
מיקרוסקופ, למשל חיידקים,
אצות, אורגניזמים
חד-תאיים ונגיפים.

פסיכרופילים (Psychrophiles)

מיקרואורגניזמים, במיוחד
חיידקים, שהסתגלו לחיים
בסביבות קרות. מקור השם
הוא במילים היווניות
'פסיכרוס' שמשמעה 'קר'
וקפוא, ו'פיליה',
שמשמעה 'אהבה'.



איור 1

הטמפרטורה ממלאה תפקיד חשוב בהישרדות יצורים החיים במקום מסוים. כאשר ישנן בקריוספירה טמפרטורות נמוכות באופן קיצוני, מיקרואורגניזמים מתקשים במיוחד לשרוד. מים הם רכיב חיוני לחיים, ובסביבה קרה קשה מאוד למצוא אותם בצורתם הנוזלית, משום שמרבית המים הופכים לקרח מוצק. לרוב האורגניזמים (חוץ מבני האדם), אין דרך להקדם קרח במקומות כה קרים. כמו כן קשה לאורגניזמים למצוא מזון ולייצר אנרגיה בקריוספירה, כיוון שהתגובות הכימיות שהאורגניזם מבצע כדי להישאר בחיים, מתרחשות לאט יותר בקור [1, 2]. עם זה בניגוד לדובי קוטב או ללווייתנים, למיקרואורגניזמים – האורגניזמים החיים הקטנים ביותר, שאפשר לראות רק באמצעות מיקרוסקופ – אין שכבה עבה של פרווה או שומן שמסייעת להם לשמור על חום. בהתחשב באתגרים הללו, נראה כמעט בלתי אפשרי שמיקרואורגניזמים זעירים יוכלו לשרוד בסביבה קפואה.

חיידקים החיים בקרח

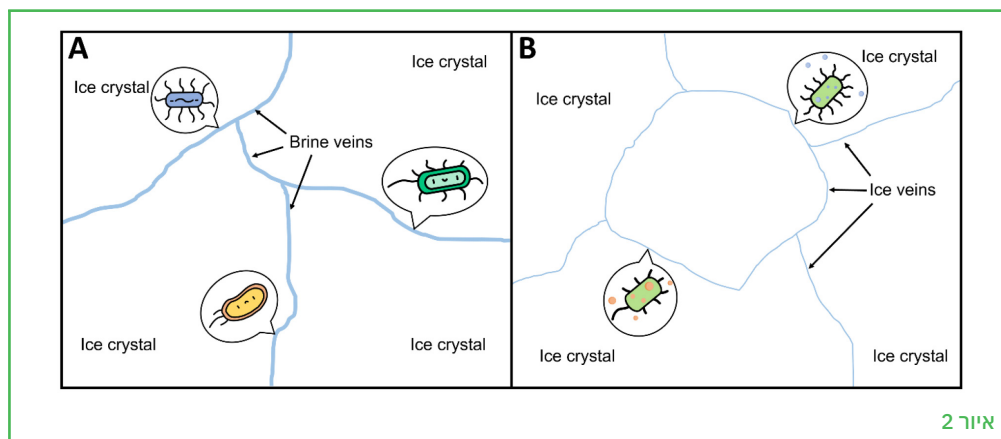
בעבר, סָבְרוּ שבסביבות קפואות לא מתקיימים חיים. המדענים חשבו בתחילה כי מיקרואורגניזמים הגיעו לסביבות קפואות באמצעות הרוח, והיו 'במצב שינה' בְּנֶשֶׁל הקור. אולם, מאוחר יותר הם גילו כי סביבות שהן קפואות באופן קבוע, מכילות שפע של מיקרואורגניזמים חיים! התגלה כי כמה מאותם מיקרואורגניזמים סיגלו לעצמם לאורך האבולוציה דרכים מיוחדות לשרוד בשלג ובקרח. המיקרואורגניזמים הללו נקראים פְּסִיכְרֹוּפִילִים. משמעות השם ביוונית היא 'אוהבי-קור'. פסיכרופילים הם בדרך כלל חיידקים, אך עשויים גם לכלול מיקרואורגניזמים אחרים [1].

מיקרואורגניזמים אינם יכולים לשרוד בקרח מוצק. עד כה, כל קהילות הפסיכרופילים שהתגלו בתוך קרח, מיריעות קרח ועד לקרחונים, שרדו בתוך עורקים זעירים של מים נוזליים שנכלאים בקרח כשהוא נוצר (איור 2). משמעות הדבר היא שהפסיכרופילים הללו ודאי הגיעו מהסביבה החיצונית, כלומר, מהאוויר, מהשלג או מפני השטח של האוקיינוסים (במקרה של קרח-ים), ונכלאו בעורקי הקרח בשלב כלשהו.

עורקי קרח בבתי גידול שונים יוצרים סביבות מחיה שונות מאוד עבור פסיכרופילים. נבחן את שתי הדוגמאות האלה: קרח-ים וקרח מקרחון יבשתי. קרח-ים עשוי מי-ים קפואים, והוא צף על פני האוקיינוס. הוא גָּדֵל בחורף, ומתכווץ בקיץ. בתנאים שמעל לנקודת הקיפאון, מי-הים

איור 2

פסיכרופילים בעורקי קרח.
(A) בקרח ימי, עורקי הקרח מלאים במים מלוחים, ונקראים עורקי מי-מלח. **(B)** בקרח של קרחון יבשתי, העורקים קטנים בהרבה, ולכן בדרך כלל מכילים פסיכרופילים קטנים יותר. מקרא: Ice crystal = גביש קרח; Brine Veins = עורקי מי-מלח; Ice Veins = עורקי קרח.



איור 2

מכילים מים, מלח מומס, חומרי הזנה והמוני מיקרואורגניזמים זעירים. כאשר מי-הים קופאים, רק המים יכולים להפוך לגבישי קרח, בעוד שהמלח המומס, המיקרואורגניזמים וכמויות קטנות של מים נותרים מחוץ לגבישים הללו. כך הם נלכדים בערוצי מים זעירים, הנקראים **עורקי מי-מלח**. אלה הן סביבות מלוחות מאוד, ולכן קשה לחיות בהן. במהלך חודשי החורף הקפואים, הפסיכרופילים הלכודים יכולים לשרוד בעורקי מי-המלח הקטנים הללו (איור 2A). כאשר הקרח נמס בקיץ, הפסיכרופילים חייבים לחזור לאוקיינוס. משמעות הדבר היא שעליהם להסתגל לסביבה משתנה [3]. זו עבודה קשה!

לעומת זאת, קרחונים יבשתיים הם גופים של מים מתוקים קפואים הנוצרים מהצטברות שלג, שבחלוף הזמן נדחס והופך לקרח. הצטברות השלג והקרח כבדת-המשקל, מפעילה לחץ על השכבות התחתונות של הקרחון היבשתי, וגורמת לעורקי הקרח הנוצרים בשכבות הללו להיות קטנים מאוד (איור 2B). משמעות הדבר היא שהחיידקים ששורדים בעורקי הקרח של הקרחונים הם בדרך כלל זעירים, ועליהם להישאר שם במשך זמן רב – אולי אפילו במשך מיליוני שנים! עד כה, מדענים מצאו עדויות לדנ"א חיידקי בקרח בן 500,000 שנים. אנו עדיין חוקרים את החיידקים הללו, ועדיין לא יודעים כמה זמן חיידקים יכולים לחיות בתוך הקרח [1, 3].

כיצד פסיכרופילים מגינים על עצמם מפני הקור?

בדיוק כפי שאתם עשויים ללבוש מעיל חם בחורף, או לחַפֵּךְ את כפות הידיים שלכם זו בזו כדי להתחמם בערב קר וחורפי, גם לידידינו הפסיכרופילים יש שיטות לשרוד בתנאי הקור (איור 3) [4]. אחד האתגרים הבסיסיים ביותר בחיים בקור הוא שכל דבר אֶחָד יותר זמן, בכלל זה הנעת חומרי הזנה, וכן התרחשות תגובות כימיות חשובות (כדי להבין זאת, נסו לטבול שתי שקיות תה – אחת במים קרים, והשנייה במים חמים. תוכלו לראות כי התה מתפשט לאט יותר במים הקרים). כדי לקבל מספיק מזון מהמים שסביבם, פסיכרופילים רבים מגדילים את מספר הנשאים על פני השטח של התא, שתפקידם לתפוס בצורה פעילה חומרים מזינים מהסביבה.

בעיה נוספת הקשורה לסביבות הקפואות היא היווצרות קרח. כשם ש-70% מגוף האדם עשוי מים, כך גם רוב תאי החיידקים עשויים מים, אשר בטמפרטורות קיפאון עלולים להפוך

עורקי מי-מלח (Brine Veins)

תעלות זעירות בין גבישים של קרח ימי, המלאות במים מלוחים מאוד. הן מכילות את המלח שלא נטמע כאשר גבישי הקרח נוצרו.

איור 3

המאפיינים הייחודיים של הפסיכרופילים מסייעים להם לחיות בסביבות קרות מאוד.

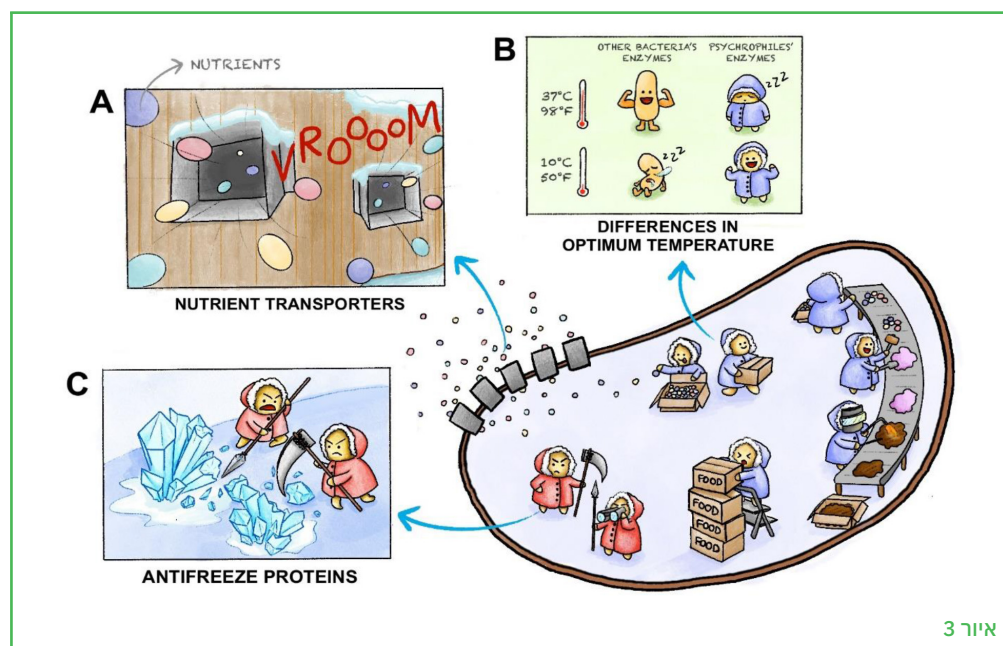
(A) לפסיכרופילים יש נשאים של חומרי הזנה (Nutrient transporters) אשר עוזרים להם לתפוס חומרי הזנה מהסביבה הקרה, שבה הדברים זזים באיטיות. (B) לפסיכרופילים יש אנזימים הפועלים בקור, שיכולים למלא את תפקידיהם בתא בטמפרטורות נמוכות.

Differences in = Optimum Temperature
הבדלים בטמפרטורה המיטבית.

= Psychrophiles' Enzymes
אנזימים של פסיכרופילים.

Other Bacteria's Enzymes = אנזימים של חיידקים אחרים. (C) לפסיכרופילים יש

חלבונים נוגדי-קיפאון (Antifreeze proteins) המונעים מגבישי הקרח להיווצר ולהזיק לתא. Food = מזון.



איור 3

בקלות לגבישי קרח. גבישי קרח בתוך תאים חיים הם מסוכנים, משום שהם עלולים לגדול כלפי חוץ כמו קוצים קטנים, לחורר את החיידקים מבפנים כלפי חוץ, וכך להרוג אותם. מסיבה זו, פסיכרופילים פיתחו כמה אסטרטגיות להימנעות מהמוות הזה. לדוגמה, הם מכניסים פנימה מלחים וסוכרים מומסים כדי להנמיך את טמפרטורת הקיפאון של מים בתוך גופם. לזנים מסוימים יש אפילו חלבונים נוגדי-קיפאון מיוחדים שמתחברים לכל גביש קרח שמתחיל להיווצר, מנמיכים את נקודת הקיפאון שלו וכך מונעים ממנו לגדול. אסטרטגיות אלה מצמצמות את הסכנות של החיים בקור.

לפסיכרופילים יש גם **אֶנְזִימִים** שונים מאלה של חיידקים שאינם פסיכרופילים. האנזימים הם כמו פועלים שנמצאים בתוך התאים. כל סוג של אנזים מבצע תגובה כימית, החיונית להישרדות החיידק. פעילותם של האנזימים היא יעילה ביותר בטווח טמפרטורות קטן שנקרא **טמפרטורה מיטבית** (אופטימלית). לדוגמה, לחיידקים מחוללי-מחלה בבני אדם יש טמפרטורה מיטבית של כ-37 מעלות צלזיוס – כמו טמפרטורת הגוף – מה שמאפשר להם לגדול בתוך הגוף האנושי ולגרום בו למחלה. אולם, אם החיידקים מחוללי-המחלה הללו ייחשפו לטמפרטורות קיפאון, האנזימים שלהם יפסיקו לתפקד ויגרמו להם להיכנס למצב של 'תרדמת'. זה לא המקרה של הפסיכרופילים. כדי שלא ימותו בטמפרטורות של קיפאון, הפסיכרופילים פיתחו **אֶנְזִימִים הפעילים בקור**, בעלי טמפרטורה מיטבית של 20 מעלות צלזיוס, או פחות [5]! זו דרך מגניבה לשרוד!

מדוע חשוב לחקור פסיכרופילים?

ההתחממות העולמית מעמידה את בתי הגידול הקרים בכדור הארץ בסכנה גדולה. מדענים נדרשים לגלות במהירות מהם התפקידים החשובים שפסיכרופילים ממלאים בסביבה, כדי להעריך את הנזק שההתחממות העולמית עלולה לגרום לקריוספרה. כמו כן, סביבות קרות נפוצות מאוד על כוכבי לכת אחרים במערכת השמש שלנו, ומדענים רבים חוקרים את

אנזימים
(Enzymes)

פועלי התא; חלבונים המסייעים לתגובות כימיות להתרחש.

טמפרטורה מיטבית
(Optimum Temperature)

הטמפרטורה שבה אנזים כלשהו מבצע את התגובה הכימית במהירות הגבוהה ביותר.

אנזימים הפעילים בקור
(Cold-Active Enzymes)

אנזימים שפועלים במהירות השיא שלהם בטמפרטורות של 20 מעלות צלזיוס, או פחות.

הסביבות הקרות על פני כדור הארץ כדי לאסוף רמזים על ההיתכנות לקיומם של חיים בכוכבי לכת אחרים [3].

מדענים רבים אף משתמשים בידע המתפתח שלנו על אודות פסיכרופילים לטובת פיתוח טכנולוגיות חדשות [5]. למשל, אנזימים הפעילים בקור כבר מצויים בשימוש תעשייתי במטרה להגביר את יעילותם של תהליכים המתרחשים בטמפרטורות נמוכות, כמו עיבוד פירות (כדי שהפירות לא ייהרסו). מדענים גם זיהו רבים מהכימיקלים הפעילים בפסיכרופילים, אשר עוזרים לפסיכרופילים להגיב לקור. ביכולתנו להשתמש בכימיקלים אלה בתרופות כדי לטפל בזיהומים, ואפילו בסרטן. נוסף על כך כיוון שהפסיכרופילים הסתגלו כל כך לשרוד בסביבות קיצוניות ועניות במזון, הם מסוגלים לפרק כמעט כל דבר שנקרה בדרכם. מכאן, פסיכרופילים עשויים להיות יעילים מאוד בפירוק פלסטיק ובטיפול בפסולת. לסיכום – באותה מידה שבה הפסיכרופילים מגוונים, כך הם שימושיים!

הצגת כלי בינה מלאכותית

טקסט חלופי הנלווה לאיורים במאמר זה נוצר על ידי פרונטירז בסיוע כלי בינה מלאכותית, ונעשו מאמצים על מנת להבטיח את דיוקו, כולל בדיקה על ידי כותבי המאמר כאשר הדבר התאפשר. אם ברצונכם לדווח על בעיה, אנו צרו איתנו קשר.

מקורות

1. Miteva, V. 2008. "Bacteria in Snow and Glacier Ice," in *Psychrophiles: from Biodiversity to Biotechnology*, eds R. Margesin, F. Schinner, J.-C. Marx, and C. Gerday (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg) p. 31–50.
2. Margesin, R., and Miteva, V. 2011. Diversity and ecology of psychrophilic microorganisms. *Res. Microbiol.* (2011) 162:346–61. doi: 10.1016/j.resmic.2010.12.004
3. Junge, K., Christner, B., and Staley, J. T. 2011. "Diversity of psychrophilic bacteria from sea ice - and glacial ice communities," in *Extremophiles Handbook*, ed K. Horikoshi (Tokyo: Springer Japan). p. 793–815.
4. De Maayer, P., Anderson, D., Cary, C., and Cowan, D. A. 2014. Some like it cold: understanding the survival strategies of psychrophiles. *EMBO Rep.* 15:508–17. doi: 10.1002/embr.201338170
5. Santiago, M., Ramírez-Sarmiento, C. A., Zamora, R. A., and Parra, L. P. 2016. Discovery, molecular mechanisms, and industrial applications of cold-active enzymes. *Front. Microbiol.* 7:1408. doi: 10.3389/fmicb.2016.01408

פורסם אונליין: 28 בספטמבר 2025

נערך על ידי: John T. Van Stan

מנחים מדעיים: Alberto Asquer | Kristen Welsh

ציטוט: Chang KYW, Tanoto FR I Lopes dos Santos A (2025) חיידקים אוהבי-קור השורדים בקרח. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.812556-he

תורגם והתאם מ: Chang KYW, Tanoto FR and Lopes dos Santos A (2022) Cold-Loving Bacteria Can Survive in the Ice. Front. Young Minds 10:812556. doi: 10.3389/frym.2022.812556

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

זכויות יוצרים © 2022 Chang, Tanoto I Lopes dos Santos. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#). 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

SOPHIE, גיל: 12

אני מתעניינת מאוד במדעים, באיור ובציור. אוהבת מנג'ה, אָנימֶה ופינגווינים, ומנגנת בכינור מאז גיל 9. בבית הספר, המקצועות האהובים עליי הם שפות זרות, ובייחוד צרפתית. אני דוברת אנגלית, איטלקית ורוסית.

SPROUTS MONTESSORI, גיל: 7–10

אנו קבוצת תלמידים שאוהבים לדעת כיצד העולם פועל. אנו מקווים שיום אחד נשתמש בידע הזה כדי להפוך את העולם למקום טוב יותר, עבורנו ועבור אחרים.

הכותבים

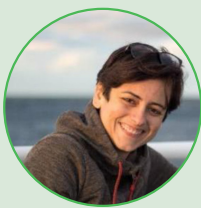
KRISTY YI WEN CHANG

אני דוקטורנטית במרכז סינגפור להנדסת מדעי החיים הסביבתיים, באוניברסיטה הטכנולוגית של נאניאנג בסינגפור. המחקר שלי הוא בין-תחומי, ובמסגרתו אני משלבת גישות חישוביות וניסיוניות. אני חוקרת הסתגלות של חיידקים לסביבות-קיצון, וכיצד אנו יכולים להשתמש בהם לייצור דברים מועילים, כמו דלק ביולוגי. כשאני עוטה את חלוק המעבדה, אני אוהבת טיולים רגליים בטבע, ספרים איכותיים, אימון בקליגרפיה על גבי לוח נחושת או כתיבת מכתבים לחברים לעט. *yiwenkri001@e.ntu.edu.sg

FREDERICK REINHART TANOTO

אני דוקטורנט במרכז סינגפור להנדסת מדעי החיים הסביבתיים, באוניברסיטה הטכנולוגית של נאניאנג בסינגפור. במסגרת המחקר שלי, אני מנסה להבין כיצד חיידקים מסוימים עלולים לגרום לזיהום בגופנו, וממשיכים להתקיים באתר הזיהום למשך זמן רב. מחוץ למחקר שלי, תמיד התעניינתי מאוד במגוון החיידקים המצויים בסביבה, הטובים והרעים שבהם, ובהשפעה העצומה של היצורים הקטנים הללו על חיינו. אה, אני גם אוהב לִשְׁרֹבֵט! *FRED0016@e.ntu.edu.sg



**ADRIANA LOPES DOS SANTOS**

בתור ילדה, אהבתי ללמוד על היצורים שמצאתי בגינה של סבא שלי. יחד, היינו מבילים שעות בניסיון לגלות באילו זנים מדובר, כיצד הם גדלו, מה אכלו וכיצד חיו. לכן, אין זה מפתיע שבחרתי להיות ביולוגית. בזמן לימודי, התעניינתי מאוד בעולמם הבלתי נראה של המיקרואורגניזמים, על מגוון צורותיו וסגנונות החיים האינסופיים שלו. ריתק אותי במיוחד עולמם הצפוף של יצורי הפלנקטון, החיים באוקיינוס. כיום, עבודתי כוללת מתן שמות לפלנקטון, תיאורם, והבנת התפקידים האקולוגיים שלהם באוקיינוסים של כדור הארץ. במסגרת מחקר הפלנקטון טיילתי ברחבי העולם, מהקוטב הצפוני ועד לקוטב הדרומי. כיום, אני גם פרופסורית באוניברסיטה הטכנולוגית של נאניאנג. שם, אני מלמדת מיקרוביולוגיה, ומקווה לנסוך השראה בדור הבא של מיקרוביולוגים, להמשיך לחשוף את פלאי העולם הבלתי נראה.

*lopesas.ufjr@gmail.com

ההכתבים הללו תרמו לעבודה באופן שווה

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



הוצאת פרונטירס מדע לצעירים ישראל

Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK



קרן משפחת

שעשוע Shashua

Family Foundation