

המפגש הבינלאומי על קרינה תעשייתית
מרכז הכנסים והתערוכות של שטרסבורג, צרפת 1-5.4.2019

The International Meeting on Radiation Processing (IMRP-19)

Strasbourg Convention Exhibition Centre, France – April 1-5, 2019

דו"ח נסיעה מאת:

ד"ר יואב גזית - מנהל

המכון להדברה ביולוגית, ענף ההדרים, מועצת הצמחים

הקדמה. בכנס השתתפו למעלה מ- 500 נציגים מ- 45 מדינות, מחציתם מהמחקר ומחציתם מהתעשייה. בעוד שבעבר תחום הקרינה התעשייתית נשלט על ידי חוקרים ומהנדסים, היום שולטים בו התעשיינים ורצונם לרכוש עוד ועוד צרכנים. גם לכנס זה (כמו לקודמו, אשתקד בתאילנד) הגעתי כשגריר שלומד את הנושא כדי להעבירו כמיטב יכולתי לעמיתיי, לאנשי המקצוע, למגדלי וליצואני הפירות בארץ. אני משוכנע שהדו"ח יעניין ויעורר את הקוראים להעמיק ולחקור בנושא גם באופן ישיר.

טעימות על קצה המזלג - סדנת דוזימטריה.

היום הראשון הוקדש לשתי סדנאות. האחת על קרינת גמא והשנייה על נושא הדוזימטריה (מדידת מינונים). בסדנא הועברו כמה הרצאות "טעימה" – הרצאות בנות חצי שעה כל אחת המתמצות בקצרות קורס בן כשבוע. **(א) הקרינה התעשייתית.** הרצאה הראשונה עסקה בשימושים שונים של קרינה בתעשייה כמו שינויי מצב כימי של פולימרים שונים (צמיגים או בידוד של כבלי חשמל), השבחת אבני חן (טופז כחול, למשל), שינוי תכונות של חומרים מוליכים למחצה, חיטוי מוצרים רפואיים או מזון (מפתוגנים) וטיפולים פיטוסניטריים. בהרצאה הוצגו עקרונות שלושת סוגי הקרינה (גמא, בטא ורנטגן) והחשיבות הרבה לפיזור ככל האפשר הומוגני של מנת הקרינה במוצר ומכאן לחשיבות הרבה של מדידה מדויקת של מינון הקרינה (דוזימטריה). עקרונית המינון הגבוה מתקבל על פני המוצר והמינון הנמוך, באמצע הנפח שלו. היחס הקובע הוא היחס בין המינון הנמוך ביותר למינון הגבוה שמתקבל באתרים שונים במוצר. דפוס התפזרות קרינת הגמא במוצר (פוטונים) שונה מזה של קרינת הבטא (אלקטרונים) וההבדל ביניהם מכתוב מיקום שונה של חיישני הקרינה לקביעת המנה. העיקרון בהקרנה הוא שהמוצר יקבל את שטף הפוטונים (גמא או רנטגן) או שטף האלקטרונים המרבי.

(ב) חוסר וודאות, (uncertainty) בוודאות היה הנושא העיקרי של הסדנא. אי הוודאות מושפע (א) מגורמים הניתנים לחישוב כמו משתנים המסופקים על ידי היצרן והצרכן שניתן להעריכם על פי התפלגות סטטיסטית של סדרת מדידות ולאפיין אותם באמצעות תקן; (ב) מגורמים שלא ניתן לחשב אותם סטטיסטית תלויים באמצעי המדידה עצמו – למשל אחידות החומר ממנו עשוי חיישן הקרינה (דוזימטר) או השונות בעוביו. (למרות שנושא אי

הוודאות הנוכחי עוסק בדיוק מדידת הקרינה, לדעתי הוא נוגע ב"עקרון אי הוודאות" של הייזנברג, בכך שגם אם הדוזימטר יקבע במדויק את מנת הקרינה שקיבל בנקודה בה הוצב, הוא לא יוכל לקבוע את המנה שהתקבלה (לידו).

(ג) עקיבות במדידות. היכולת לקשור את התוצאה הנמדדת לשרשרת מתועדת של כיולים שהביאו אליה, שכל אחד מהם תורם לחוסר הוודאות של המדידה. למשל, תוצאה נמדדת מושפעת בראש וראשונה מהכיוול (של אמצעי המדידה השונים) של הלשכה הבינלאומית למידות ולמשקלות, אחר כך מהכיוול של מכון התקנים הלאומי, אחר כך מכיוול הרגשים המכוילים (והיקרים) שבאמצעותם מביילים את המערכת ולבסוף מהרגשים עצמם המשמשים למדידת המנה במוצר. בנוסף, התגובה של רוב הדוזימטרים לקרינה אינה קווית (לינארית), לכן יש לבצע עבורם עקומת כיוול בתהליך מדויק ושיטתי שמאפשר עקיבות במדידה ויודיו שכל החיישנים ומכשירי המדידה עובדים כהלכה.

(ד) דוזימטריה. מהווה תיעוד המלווה עיקור מוצרים באמצעות קרינה ומשמשת להגדרת תהליך העיקור, לקביעת המינון המקסימלי האפשרי מבחינת המוצר והמינון האפקטיבי הנדרש לקבלת העיקור. כמו כן היא משמשת בשלב ההתקנה של מתקן הקרינה ולצורך הסמכתו להפעלה תעשייתית; היא משמשת למיפוי רמות הקרינה במתקן (בלי המוצר) כדי לאפיין אותו וכן היא משמשת לבקרה שגרתית לתהליך ההקרנה. יש הבדל בין מדידות של קרינת גמא ממקור שכל הזמן פולט קרינה לבין קרינה של אלומת אלקטרונים שמושפעת מההדלקה והכיבוי של המערכת. כיוון שאין אפשרות למדוד קרינה בכל מקום בתוצרת, יש לפתח אסטרטגיות שונות למיקום הרגשים באופן האפקטיבי ביותר. במקביל לשיפור בבקרת האיכות, יש לפתח פרוטוקול לקבלת החלטות במקרה של חריגה באיכות.

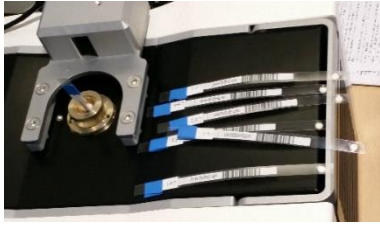
(ה) חוסר וודאות בקרינה התעשייתית. נתון זה מתבטא את כמות הספק לגבי תוצאת המדידה. הוא משפיע על איכות המדידה ועל עקומות הכיוול המתבצעות, התחשבות בו מאפשרת קבלת מידע מדויק יותר אודות התוצאה (כלומר, המינון הנספג במוצר) והוא מושפע מכל המקורות התורמים לו. למרות הדמיון, לא מדובר בשגיאה שהיא ההפרש בין הערך הנמדד לערך האמתי. בשלב בו עבר המרצה למתמטיקה – איבדתי אותו...

מעבדת דוזימטריה – התנסות בשיטות שונות



עמדה 1: דוזימטרים מפרספקס – Harwell Red 4034 Dosimeters
פיסות פרספקס באורך 3 ס"מ רוחב ס"מ ועובי של כשני מילימטר (ראה משמאל). הם מיועדים לעבודה בטווח מינונים שבין 5 kGy (פי חמישה מהמקסימום המותר בקרינה פיטוסניטרית, Gy = גריי, kGy = קילו גריי) ל-50 kGy – כלומר אלה לא רלוונטיים לטיפול קרינה בפרי. בכל מקרה הקריאה שלהם משכללת שני משתנים: (א) את הצבע שקבלו בהקרנה (קריאה בפוטומטר) ו- (ב) את עוביים המדויק (קריאה במכשיר נפרד).

עמדה 2: דוזימטרים מסוג Radio-chromic (כמו אלה המשמשים בשור-ואן הקרנות) שמבוססים על משטח (פילים) בצבע וורוד, צבע אשר דוהה בעקבות הקרינה. רגשים אלה מתאימים לטווח שבין 1 kGy (המקסימום המותר בקרינה פיטוסניטרית) ל-150 kGy וקוראים אותם בפוטומטר ייעודי (ראה משמאל). בגלל שהם רגשים לקרינת UV הם מצופים צלופן שקוף נגד UV. בעמדה הוצגו גם דוזימטרים דומים שצבעם כחול מסוג FWT-60 שטווח רגשותם הוא בין 0.5 kGy ל-200 kGy – שוב, גם אלה לא רלוונטיים לפיטוסניטריה.



עמדה 3: דוזימטרים של אלנין (כאלה דרושים לקרינה הפיטוסניטרית). הרגשים האלה מאוד אמינים וטווח רגישותם נע בין 0.1 Gy (= עשירית גריו) ל-70 kGy. ניתן לקבלם כגלולות בתפזורת (שכמותם רכשנו לניסויי ההקרנה שערכנו) או כמוסים בלשונית פלסטיק מוגנת ממים עם ברקוד (ראה משמאל). הדוזימטרים נקראים באמצעות מכשיר למדידת תהודה מגנטית אלקטרונית (EPR). לפי הצוות של א'אריאל (Aerial) עלות מכשיר כזה נעמדת בכ-50,000 אירו ועלות התוכנה לקריאת הדוזימטרים נעמדת על 10,000 אירו. סה"כ מדובר בכ-60,000 אירו (כ-242,000 ₪).

מכון א'אריאל (Aerial) – סדקס, צרפת

מכון א'אריאל הוא גם המרכז של סבא"א לשת"פ במו"פ בנושא קרינה תעשייתית, נמצא כ-20 קילומטר מחוץ לשטרסבורג. המעבדות והמתקנים שבו כמו מתקני הקרנה ניסיונית ומעבדות קרינה, מיקרוביולוגיה, כימיה פיזיקלית, הערכה חושית והקפאה בייבוש, מוקדשים למחקר והדרכה יישומית בתחום הקרינה התעשייתית. את



הסיוור ארגן מנהל המכון, ד"ר אלן סטרסר (Alain Strasser), מומחה לפיסיקה של הקרינה בכלל ולדוזימטריה בפרט. המכון חדיש מאוד ולפני כשנה הסתיימה הבנייה של הבונקר של המאיץ החדש ושל חללי ההקרנה שלו. במסגרת הפרויקט Feerix® לקרינה מייננת של אלקטרונים ורנטגן. המעבדה הראשונה בה ביקרנו היא מעבדה כימית-פיזיקלית העוסקת בזיהוי של מוצרים מוקרנים, בעיקר עבור התקינה באירופה. בשעת הביקור הם בדקו אם משלוח של רגלי צפרדעים עבר קרינה (שינויים כימיים ברקמות השונות). מעבדה שניה עוסקת בהערכה חושית של טיב המזון. המעבדה מבוססת על חדר אפלולי ובו כ-10 עמדות אישיות, מבודדות זו מזו שבכל אחת יושב/ת טועם/ת/ מריח/ת שמעריך/ה את איכות המזון המוקרן. המעבדה למיקרוביולוגיה היא מחוץ לתחום לביקורים ובה לא ביקרנו. בהמשך ראינו את מאיצי האלקטרונים. תחילה מאיץ "ישר" (ואורך) כבן 30 שנה שמחולל אלומת

אלקטרונים בעוצמה של 2.5 MeV (MeV = מיליון וולט) ואחר כך, בבונקר נפרד וגדול ראינו את "הבייבי של אלן" מאיץ חדש מסוג רודטרון T-300 של IBA, שפועל באמצעות מגנטים רבי עוצמה שמסתובבים במהירות עצומה ותוך כדי משנים את כוון האלומה ומסחררים אותה הלוך ושוב בתוך המכשיר ובכל פעם שהאלקטרונים עוברים בליבה הם מואצים בעוצמה של 1 MeV. באופן זה המאיץ מסוגל לחולל בו זמנית שלוש אלומות אלקטרונים בנות 5, 7 ו-10 MeV כשההבדל ביניהן הוא מספר הפעמים שעברו בליבה. האלומות יוצאות מהבונקר בו נמצא המאיץ דרך שלושה מוליכים לשלושה חדרי הקרנה, לפי היעודים השונים. הקרן בעוצמה של 10 MeV (לכוון הקיר הירוק בתמונה העליונה) יוצאת אופקית לעבר מתקן הקרנה תעשייתי הנמצא בחדר הסמוך ובו באמצעות אלקטרו-מגנטים היא מוטה 90° כלפי מטה ונפרשת לקרן ברוחב 80 ס"מ – כרוחב מסוע מטענים (ראה תמונה למטה של הקרן ממנה יוצאת האלומה הצנרת קשורה למערכת קירור בשל פליטת החום).

הקרן בעוצמה של 5 MeV (בתמונה למעלה - מכוונת מהרודטרון כלפי המצלמה) מיועדת לבדיקות שונות ולכיל. והקרן בעוצמה של 7 MeV (לכוון צד שמאל של התמונה) מיועדת להפיץ לוח מתכת ולחולל "קרינת בלימה" (ברהמשטרלונג) – כלומר קרינת רנטגן (X) (בתמונה למטה לוח המתכת בו פוגעת אלומת האלקטרונים). יש

לציין שקרינת הרנטגן מורכבת מפוטונים. לכן, בניגוד לחלקיקים שפגיעת קרינה תניעה אותם קדימה, חלק מהפוטונים של הרנטגן נפלטים בדיוק 180° אחורה.

הכנס על הקרינה התעשייתית

ההרצאות השונות שניתנו במהלך הכנס כיסו את השימושים השונים של הקרינה התעשייתית. אנסה לפרט בקצרה:

יצירת חומרים חדשים ברפואה שלא היכרנו בעבר באמצעות מניפולציות ברמת המולקולה (ננו-טכנולוגיה) כמו ננו-חלקיקים להם מחדירים ננו-חלקיקים של זהב רדיואקטיבי שפולט קרינת גמא. המולקולות הללו מונחות ליעדם (לגידולים סרטניים, למשל) ושם גם מצביעים ומסמנים את הגידול וגם מקרינים ופוגעים רק בו. תחבשות המכילות ננו-חלקיקים לחולים במחלות עור נוראיות כמו צרעת.

חומרים חדשים בתעשיית הרכב. הקרינה משמשת להקניית תכונות כימיות חדשות לחומרים – כמו עמידות וחוזק לצמיגים או לבידוד פלסטי של לכבלי החשמל. חומרים פלסטיים מרוכבים ומוקרנים עשויים להחליף בתכונותיהם ובחוזקם חלקי מתכת. השימוש בהם מפחית בצורה משמעותית את משקל הרכב (ואת צריכת הדלק, למשל). כוון נוסף הוא של ציפוי מתכות בשכבת ננו של חומרים דוחי מים (וקורוזיה).

הקרנת מזון

הקרנת ביצים. ביפן הקרנת מזון מתחת ל-0.1 גריי לא נחשבת "קרינה" לכן קיבלנו הרצאה מפורטת על מחקר יפני על הקרנת ביצים על קליפתן בעוצמה של 0.3 גריי כנגד פתוגניים שונים כמו סלמונלה, באופן שלתוך הביצה לא תחדור קרינה שתעלה בעוצמתה על -0.1 גריי. לצורך זה הם פתחו מסוע מיוחד שמגלגל את הביצים במהלך ההקרנה במהירות של 1.7 סיבובים לשנייה (יותר מזה הן תעופנה) כדי לקבל אחידות בהקרנה.

נקודה מעניינת למחשבה: בגלל שקליפת הביצה עשירה מאוד בסידן, פגיעת אלומת האלקטרונים בה יוצרת "קרינת בלימה" (רנטגן) בדומה לזו הנוצרת מפגיעת האלומה בלוח המתכת. להבנתי, ניתן להשתמש בתכונה זו של חומרים מסוימים כשמשמשים באלומת אלקטרונים כדי להגביר את יעילות ההקרנה.

הקרנת פרי באווירה מבוקרת. פיטר פולט (ארה"ב) דיבר על האפשרות להקרין פרי באווירה מבוקרת ענייה בחמצן (עשירה בחנקן או בפד"ח) כשהפרי ארוז בתוך שקיות ניילון. הבעיה היא שהתקן הבינלאומי (ISPM28) אוסר זאת ושגם ה-USDA אוסרת הקרנה באווירה של פחות מ-10% חמצן. וזה למרות מחקרים מראים שבאווירה דלת חמצן ניתן לקבל יעילות במינונים נמוכים יחסית של הקרנה.

הקרנה משולבת עם חומרים ננו-מרוכבים. הקרנת תוצרת חקלאית לאחר שמטפלים בה בננו-תחליבים של שמנים ארומטיים, כמו טימין משולב עם שמן עץ הטה או עם מנטה, כשתכונות התחליב גורמות להם להשתחרר בצורה איטית לסביבה, משמשת ביעילות לקטילה של עובשים ושל חרקים מזיקים.

חידושים בתחום ההקרנה

מחקר אחד עסק בהתייחסות לעובי התוצרת, במיוחד בשימוש באלומת אלקטרונים. שילוב של שיקוף רנטגן לקביעת דחיסות התוצרת ושיפור פיזור מנת ההקרנה של אלומת האלקטרונים. עדין נשארה הבעיה של המנה שמתקבלת בשולי התוצרת. מחקר נוסף דן בשיפור מבנה הדוזימטר והתאמתו הגיאומטרית לסביבה הנמדדת.

במחקר נוסף התמקדו במתקני רנטגן באנרגיה נמוכה שצורכים פחות מ- 100 קילו-וולט ומתאימים להקרנת מזון (פיטוסניטרי) וכן לחיטוי ציוד רפואי ולהקרנת מנות דם. מאיצים חדשים.

שיחות עם עמיתים

ד"ר אלן סטרסר (Alain Strasser, מ- AERIAL – Technology Resource Centre שבסדקס, צרפת) מומחה לפיסיקה של הקרינה בכלל ולדוזימטריה בפרט. המכון אותו הוא מנהל נמצא בחוד החנית של התחום ובמידה שישראל תהיה מעוניינת להיכנס לטיפול קרינה, שת"פ עם א'ריאל יוכל לעזור בין אם בקורסים (דוזימטריה למשל) ובין אם בשת"פ מחקרי בנושאים רבים בתחום.

ד"ר פיטר פולט - אנטומולוג מה- USDA שיושב בהילו, הוואי. הוא עובד כיום על פיתוח מתקני רנטגן באנרגיה נמוכה. לפני שנתיים, פולט כתב יחד עם ד"ר רבקה ברקאי-גולן (הייתה חוקרת במחלקה לאחסון של וולקני), ספר על טיפולי קרינה פיטוסניטריים. הוא מתמקד כיום בבדיקה של טיפולי קרינה באטמוספירה מבוקרת נטולת חמצן. שאלתי אותו על האפשרות להשתמש באוזון (גז רעיל) שנוצר מההקרנה של החמצן, כדי להגביר את האפקט הפיטוסניטרי. לדעתו זה לא ישים, בין השאר בגלל העלות הכרוכה בשהיית התוצרת עם אווירת האוזון לפני סילוקו והעברתה לאריזה.

אבס נסרדין – דוקטורנט בא'אריאל אשר חוקר את נושא מתקני הרנטגן באנרגיה נמוכה. נראה שזה הכוון שישראל צריכה להתמקד בו וללמוד ולפתח – מתקני רנטגן שיוצבו בבתי אריזה ויקרינו את הפרי לפני אריזת הפרי על המשטח. נסרדין מתמחה בפיתוח מערכות להקרנת רנטגן באנרגיה נמוכה ובכוונתי לנסות ליצור עמו קשר.

ריצ'רד גלוויי (Richard Galloway) ואבן קסו (Evan Xu) מ-iba-Industrial and Sterilization Solutions: <http://www.iba-industrial.com/> אותם פגשתי בדוכני החברות המממנות שמחוץ לאולם. פניתי אליהם כיוון שלתחושתי, לא הכול נאמר ונבדק בנושא הקרינה המייננת החשמלית (אלקטרונים ורנטגן) ועדין מפתחים מאיצים יעילים יותר ורנטגן באנרגיה נמוכה (ובעלות ובמיגון נוחים יותר). יש לחברה זו ידע עצום בתחום הקרינה החשמלית, המאיצים והרנטגן ואני חושב שכדאי לקשור איתם קשר לנושאים הטכניים של הקרינה.

סרטונים מעניינים:

1. סרטון מואץ של תהליך בניית מרכז ההקרנה בא'ריאל:
<https://imrp-ia.com/programme/imrp-tour-aerial-and-the-feerix-project>
2. הכנסת הרודוטרון T-300 לבונקר המיועד לו במכון, כולל סגירת הפתח הייעודי להכנסתו בתקרה:
<https://imrp-ia.com/programme/imrp-tour-aerial-and-the-feerix-project>

מחוץ לכנס

פגישה עם נציגים של חברת FMC לגבי חומר ההדברה אקסירל אותו בדקנו לאחרונה נגד זבובי הפירות

בפגישה השתתפו: ז'אן לוק ריזון (מנהל טכני אזורי), מגלי גרבויל – (ביולוגית, חוקרת ראשית) וווירג'יניה גיל-אלברט (ניהול מסחרי). בפגישה דובר על החומר אקסירל, שהוא רעל קיבה שעובד על מערכות שרירים בחרק (לא על עצבים), כחלופה לסקסס להדברת זבובי פירות. אחרי שהצגתי את התוצאות של הניסויים שלנו ואת זה שהחומר לא "טעים" לזבוב במעבדה, לא פעל כתלות במינון, דורש שיפור של הפיתיון ולא יעיל נגד זבוב האפרסק, הם הציגו את נפלאותיו נגד הזפי"ת בעולם ואת את שילובו היעיל (שני טיפולים עוקבים בתחילת עונה) במערכת ההדברה נגד הזבוב. עיון מדוקדק במצגות שלהם מראה שגם הם לא קבלו 100% תמותה במעבדה וכן שהחומר גורם לתופעת Knock-down: לאחר שהזבוב נראה (ונספר) כמת, הוא מתאושש מהשפעת החומר – מה שמצביע על קיומו של מנגנון ביוכימי לפירוק הרעל בזבוב ומכאן על חשש לפיתוח עמידות (בגלל זה הם ממליצים להשתמש בו פעמיים בתחילת העונה ואחר כך להמשיך עם ההדברה השגרתית). בניסויי השדה הם מציגים שהחומר יעיל נגד זפי"ת ואולי אף יותר מהסקסס.

אנחנו בדקנו רק את התמותה במעבדה ולכן הם טענו שבפרדס החומר עבד כיוון שגם אם הזבובים לא מתו, הם נפגעו מספיק כדי שלא יחוללו נזק. הסברתי להם שגם אם טענתם נכונה, הסתייגותנו מהחומר נובעת מהטעמים הבאים: (א) החומר יקר (יחסית לסקסס); (ב) החומר לא היה יעיל נגד ז"א; (ג) החומר אינו אורגני (הסקסס כן); החברה עצמה חוששת מפיתוח עמידות.

במהלך הפגישה הרהרתי בכך שאולי בגלל ההתמקדות בתמותת הזבובים, מיהרנו לפסוק. הפגיעה בשרירים עשויה להשפיע על פעילויות שונות שתגרומנה לכך שהזבובים שיחיו, אכן יהיו "נכים" ולא מזיקים. האקסירל מיצג קבוצה של חומרים שלא פועלים על העצבים ושווה להכירם טוב יותר. לכן אני שוקל לבצע ניסויים לבדיקת השפעת החומר על משתנים כמו אכילה, תעופה, הזדווגות והטלה.

רשם: יואב גזית