**סיכום פעילות מחקרית חיצונית של ד''ר רונן בר-זיו**

* כיום חוקר מוביל וראש המחלקה לכימיה אי-אורגנית, קבוצה המונה כ-15 חוקרים (מרביתם בעל תואר Ph.D) כאשר העשייה המחקרית כללה בין היתר פיתוח תהליכים והקמה של מוקד ידע בנושאי כימיה אי-אורגנית. לפני תפקידי הנוכחי, מילאתי בקמ''ג תפקיד של כימאי ראשיבמכונים שונים וכמנהל מעבדה. במסגרות הללו, עסקתי בהובלה של מחקר ופיתוח של תהליכים חדשים, כימיה של קרינות, כימיה קואורדינטיבית ומנגנונים אי-אורגניים, אשר הובילו ליישום ושיפור של תהליכים ולפיתוח והטמעה של שיטות אנליטיות. עבודות מחקר התפרסמו בדוחות פנימיים רבים והוצגו בפורומים מקצועיים, וזכו להכרה מקצועית, כולל זכייה בפרסים.
* במסגרת עיסוקי בתחום האקדמי, סיימתי את לימודי הדוקטורט במחלקה לכימיה באב"ג בהנחייתו של פרופ' דן מאירשטיין. נושא העבודה היה מנגנוני התגובות של רדיקלים עם ננו-חלקיקי מתכות ותהליכים קטליטיים המתרחשים בפני השטח אשר הופקו בשיטה של קרינה רדיוליטית (עבודת המחקר פורסמה בכתבי עת מובילים (ראה רשימת פרסומים), ואף זכיתי בפרס הצטיינות על הישגיי). המשכתי להוביל ולעסוק בנושאי מחקר של כימיה של קרינות ותגובות של רדיקלים ואפקטים קטליטיים של ננו-חלקיקים ליישומי אנרגיה מתחדשת. המחקרים מבוצעים בחלקם במסגרת קרן פזי ובשת''פ עם החוקרים **פרופ' דן מאירשטיין, ד''ר תומר צדקי, פרופ ישראל זילברמן ופרופ' מאיה בר-סדן,** שכללו פרסום מאמרים גם כחוקר מוביל (Corresponding author) והצגתם בכנסים. שיתופי הפעולה הללו כוללים הנחייה משותפת של סטודנטים מקמ''ג ומאב''ג לתארים מתקדמים. בנוסף, משמש כשופט (רפרנט) של מאמרים בכתבי עת מבוקרים בכימיה, כדוגמת: Chem.Phys.Chem, European Journal of Inorganic Chemistry, Advance science, Nanotechnology
* במסגרת הפעילות המחקרית פרסמתי 23 מאמרים **בעיתונות מבוקרת** (ברובה בכתבי עת עם אימפקט פקטור גבוה) ועבודות מחקר פנימיות מבוקרות בקמ''ג (מעל 80).

**פעילות אקדמית**

פעילותי ממוקדת בהבנת תהליכים ומנגנונים קטליטיים בהשפעת קרינה בנוכחות ננו-חלקיקים ותהליכים אלקטרו-קטליטיים ליישומי אנרגיה מתחדשת:

* נושא עיקרי עוסק בחקר מנגנוני התגובות של רדיקלים וצורוני ביניים קצרי חיים עם ננו-חלקיקי מתכת המרחפים בתמיסה ותהליכים קטליטיים המתרחשים בפני השטח. את הרדיקלים הפקתי בשיטות של כימיה קרינתית-רדיוליטיות (מקורת גמא). נוכחות חלקיקי מתכת בתמיסות מוקרנות מהווה מצע קטליטי להתרחשות תגובות כימיות. במקרים רבים ניצולת תוצרי הרדיוליזה מושפעת מ- Solid/liquid interface ותגובות בפני השטח ולכך יש היבטים בטיחותיים של התפתחות גזים ותהליכי קורוזיה בפני השטח. להבנה של מנגנונים כימיים-רדיוליטיים המתרחשים במערכות אלו קיימת חשיבות בהקשרים הבאים: (1) אחסון טכנולוגי בטוח של פסולת רדיואקטיבית ולהתפתחות גזים כמו מימן **(H2)** ולתהליכי redox המאותחלים בנוכחות קרינה מייננת. (2) תגובות כימיות המתרחשות תחת שדה קרינה בשפכים רדיואקטיביים המכילים תרחיפים ומומסים (3) הבנת מנגנוני נזק ותהליכים קטליטיים תחת שדה קרינה (דלק מוקרן וכו'). מחקרים אלו, נעשו בשיתוף עם **ד''ר תומר צדקי ופרופ' חיים כהן מאוניברסיטת אריאל** במסגרת מענק מחקר משותף מקרן פזי ועם קבוצתו של פרופ' מאירשטיין מאב''ג וכללה בין השאר הנחייה משותפת של סטודנטים.
* נושא מחקר נוסף עוסק בפיתוח של חומרים שכבתיים מתקדמים מבוססי צ'לקוגנים (TMD) של מתכות מעבר (MoS2, W(Mo)Se2) כקטליזטורים ליישומם באנרגיה מתחדשת (הפקת מימן מפיצול מים, חיזור CO2 לדלקים נוזליים), ובתהליכים פוטוכימיים ואלקטרו-קטליטיים (פירוק ונטרול מזהמים). ברוב ממנגנונים של תגובות אלו נוצרים רדיקלים אלקיליים ואטומי מימן כתוצרי ביניים קרוב לפני השטח של הזרז בדומה לתגובות רדיוליטיות שתוארו לעיל. תרומתי העיקרית היתה בפענוח והבנה של מנגנוני הקטליזה של חומרים אלו והגורמים המשפיעים עליהם**.** כולל פיתוח שיטות מחקר אלקטרו-כימיות שהובלתי. מחקרים אלו הם בשיתוף **עם פרופ' מאיה בר-סדן** מאוניברסיטת בן-גוריון אשר החל במהלך שהותי בשבתון (2016-17) ונמשך עד היום, וכולל פרסום מאמרים משותפים והגשת הצעות מחקר והנחיה משותפת של סטודנטים לדוקטורט.

בתתי הפרקים הבאים יובא תקציר של הישגי המחקר בנושאים השונים (מס' הסימוכין מתייחס לרשימת הפרסומים המדעיים בקו''ח):

**Radiation Chemistry as a tool to elucidate reaction mechanisms of radicals with metal nanoparticles dispersed in aqueous solutions [13,14,15,18,20]**

במחקרים אלו נלמדו מנגנוני התגובות שבין רדיקלים אלקיליים לבין תרחיפים של ננו-חלקיקים (NPs) בתמיסות מימיות (תוך שימוש בשיטות רדיוליטיות). תגובות כימיות רבות מתרחשות דרך מנגנונים בהם נוצרים רדיקליים כצורוני ביניים, כך למשל בתהליכים קטליטיים, אלקטרוכימיים, פוטוכימיים ורדיוליטיים. קיימת חשיבות רבה לחקירת תהליכים אלו על מנת להבין מנגנוני תגובות קטליטיות הומוגניות או הטרוגניות. הבנה זו מאפשרת שיפור של תהליכים קטליטיים, לצורך הגדלת ניצולת וסלקטיביות של תוצרים ובחירת קטליזטורים מתאימים במערכות הטרוגניות (כאשר הקטליזטור המוצק מורחף בנוזל). היתרון בשימוש בקרינה מייננת להפקת רדיקלים נעוץ בכך שקצב יצירת הרדיקלים מוגדר וניתן לוויסות על ידי קצב מנת הקרינה הנבלעת (dose rate). מאחר שמנת הקרינה הנבלעת (dose) נמדדת והניצולת הרדיוליטית של הרדיקלים הראשוניים הנוצרים ברדיוליזה היא גודל ידוע היטב) (G value, ניתן לדעת את כמות הרדיקלים שנוצרה. עובדה זו מאפשרת ללמוד אודות התגובות בין רדיקלים לננו-חלקיקים באופן כמותי.

התוצאות שהתקבלו במחקר מלמדות כי רדיקלים מגיבים מהר מאוד עם ננו-חלקיקים מתכתיים, בתגובות נוצר תוצר ביניים, בעל קשר σ מטיפוס (M0)-(R)n. המחקר נעשה בצורה שיטתית תוך שינוי סוג המתכת וריכוזם של החלקיקים, שליטה על קצב יצירת הרדיקלים, ריכוז מצב עמיד [∙R]ss, אופי הרדיקל ושימוש בלוכדים [14,15,18,20]. תוצאות המחקר מלמדות כי כאשר תרחיפים של זהב וכסף הוקרנו במקור ה- γ (בעל קצב דוזה נמוך) בנוכחות (CH3)2SO, לשם יצירת רדיקלי מתיל ,·CH3, נמצא כי היחס בין תוצרי המתאן לאתאן יורד דרמטית ביחס לתמיסת הייחוס (בהעדר (NPs. כלומר, התוצאות מראות כי רדיקלי מתיל מגיבים בתגובות מהירות מאוד ( (k >1×108 M-1s-1 עם NPs מתכתיים של זהב וכסף [18]. בתגובה זו נוצר תוצר ביניים, (NP)-(CH3)n, בו המתילים קשורים קוולנטית ל-NPs. תוצר זה מתפרק לתת אתאן, וכך ה-NPs משמשים קטליזאטורים יעילים ליצירת אתאן. זמן החיים (τ) המינימאלי של תוצר הביניים, (NP)-CH3 חושב מקצב יצירת הרדיקלים וריכוז ה-NPs ונמצא באופן מפתיע כארוך (סדר גודל של שניות). במחקר המשך [15] שפורסם בכתב העת המוביל Chemistry- a European journal (בו אני מופיע כמחבר ראשי (PI) נמצא כי בתגובות של רדיקלי מתיל עם ננו-חלקיקי פלטינה התוצר העיקרי שמתקבל הוא שכבה של מתילים הקשורים בצורה יציבה לחלקיק, (Pt°-NP)-(CH3)n, העובדה כי מרבית קב' המתיל קשורות לאטומי פלטינה שכנים על פני השטח, ללא יצירת אתאן, מלמד כי חוזק הקשר Pt-CH3 גדול ממחצית חוזק הקשר C-C באתאן בהתאמה לחישובים. שכבה זו משפיעה על התכונות הקטליטיות של חלקיקי הפלטינה. כמו כן, הראינו כי טיפול הגורם לספיחת מימן לפני השטח של החלקיקים משפיע באופן ניכר על הרכב התוצרים ועל היחס CH4/C2H6 בתגובה עם רדיקלי מתיל [13] . בנוסף, נמצא כי הכנת NPs ממלח קדם שונה משפיעה על אופי החלקיק (גבישיות, גודל ומורפולוגיה) ועל תגובותיו עם רדיקלי המתיל [15].

תגובות של תחמוצות וננו-חלקיקים של מוליכים למחצה עם רדיקלי מתיל כמו גם תגובות של חלקיקי מתכת עם רדיקלי מתיל-פראוקסיל נחקרו אף הם בהרחבה [14,20]. **תרומתי לנושאים** היא בניתוח המנגנונים הכימיים של התגובות, ניתוח התוצאות והסקת מסקנות וכתיבת מאמרים.

**פרסומים בנושא (מס' הסימוכין מתייחס לרשימת הפרסומים המדעיים בקו''ח):**

* 1. **Ronen Bar-Ziv\***, Tomer Zidki, Israel Zilbermann, Guy Yardeni, Dan Meyerstein, *ChemCatChem,* **2016**, 8, 2761 –2764
	2. Tomer Zidki, Andreas Hänel, **Ronen Bar-Ziv**, *Radiation Physics and Chemistry 124* ***(2016****) 41–45.*
	3. **Ronen Bar-Ziv\***, Israel Zilbermann, Michael Shandalov, Vladimir Shevchenko, Dan Meyerstein, *Chemistry-a European Journal*, **2015** ,21, 19000. (**Hot Paper)**
1. **Ronen Bar-Ziv**, Israel Zilbermann, Olga O. Golberg, Tomer Zidki, Guy Yardeni, Haim Cohen, Dan Meyerstein, *Chemistry-a European Journal* **2012,** 18, 4699-4805
2. Olga Oster, **Ronen Bar-Ziv**, Guy Yardeni, Israel Zilbermann, Dan Meyerstein, *Chemistry-a European Journal* **2011,** 17, 9226-9231

**Redox catalysis induced by strong reducing radicals [4,5,8,10,16]**

מחקרים אלו נעשו בחלקם בשיתוף פעולה עם ד''ר תומר צדקי מאונ’ אריאל במסגרת מענק מחקר משותף **שקיבלנו מקרן פזי** של וא''א במחקר הפקנו רדיקלים מחזרים חד-אלקטרונים בהקרנה של תמיסות מימיות בקרינת גאמא, כמו רדיקלי קתיל·C(CH3)2OH , (פוטנציאל חיזור קתודי מאוד (E0[(CH3)2CO/·C(CH3)2OH = -1.39 V] ואלקטרונים ממוימים בקרינה, על-מנת ליצור מטען שלילי על ננו-חלקיקים ((NPs, מטען שיכול לחזר מים ליצירת מימן מולקולרי (H2). לפיכך, בתגובות אלו ה- NPs מכונים "ננו-אלקטרודות" [4,5]. במנגנון שהוצע חל מעבר אלקטרון מהרדיקלים אל חלקיק המתכת ליצירת "מאגר של אלקטרונים" על פני השטח שיכול לחזר מים וליצור מימן, ברגע שהושג מתח הסף הדרוש. הציפייה במחקר זה הייתה כי קישור ננו-חלקיקי מתכות כמו כסף וזהב לננו-חלקיקי סיליקה ליצירת חלקיקים מרוכבים NCs (SiO2-M0) (M0= Ag, Au) תאפשר קבלת ריכוזים גבוהים של מתכת בתרחיפים ובכך להגדיל את ניצולת המימן המולקולרי בתגובת של תרחיפי המתכות עם רדיקלי הקטיל המיוצרים ע"י קרינת [5] . ציפייה זו נבעה מכך שעלייה בניצולת האלקטרונים הממוימים בגלל המצאות הסיליקה (בנוכחות 2-פרופנול ואצטון), תביא לעלייה בניצולת הרדיקלים המחזרים ובהמשך לעלייה בניצולת הקטליטית של המימן המולקולרי. תחילה, התוצאות הראו שאכן הוספת ננו-חלקיקי סיליקה לתמיסות של 2-פרופנול ואצטון מעלה את הניצולת הרדיוליטית ליצירת מימן מולקולרי. אבל כאשר הוקרנו תרחיפים של NCs סיליקה-מתכת, התוצאות הראו מגמה הפוכה – ניצולת המימן המולקולרי ירדה ככל שריכוז ה- NCs עלה[5] . הסברנו זאת בתגובות מתחרות שמתרחשות (כמו דיספרופורציונציה של רדיקלי הקתיל). אין ספק שלנשא יש השפעה מכריעה על אופי החלקיקים, וזאת למרות שסיליקה נחשב לכאורה מצע אינרטי. במחקר נוסף שפרסמנו[8] , כחלק **מעבודת המסטר של גדי בנימיני (עתודאי מקמ''ג) בהנחייתי** בשיתוף עם פרופ' מאירשטיין מאב''ג, הראינו כי המטען הנצבר בפני השטח של החלקיק מביא לחיזור מומסים אחרים, אשר במקרה של פר-כלורט מבוטא בהיווצרות כלוריד בתמיסה, ובמקביל לירידה בניצולת המימן. הוצעו שלושה מנגנונים אפשריים להתרחשות תגובת החיזור של פר-כלורט לכלורט, המערבים מעבר דו-אלקטרוני מהחלקיק לפר-כלורט, אך נבדלים בתוצרי הביניים[8] . מחקר זה פותח פתח למחקרים בתחום סילוק ונטרול פשוט של מזהמים ממי-שפכים והראינו כי מנגנונים דומים מתרחשים גם בשימוש בשיטות אלקטרוכימיות [10].

במחקר שפרסמנו לאחרונה [4] בכתב העת (**Angewandte Chemie** (Impact factor-12.1 במשותף עם ד''ר תומר צדקי, פענחנו בשימוש בסמנים איזוטופים (ומדידת יחס (H2:HD:D2, את מנגנון קטליזת יצירת מימן מחיזורH2O על ידי BD4-/BH4- בנוכחות זרזים של ננו-חלקיקי זהב וכסף [4]. תרומתי לנושאים היא בגיבוש כיווני המחקר ופענוח המנגנונים, ניתוח והסקת מסקנות וכתיבת המאמרים (חלקם ככותב ראשי).

**פרסומים בנושא** (מס' הסימוכין מתייחס לרשימת הפרסומים המדעיים בקו''ח):

1. Alina Sermiagin, Dan Meyerstein, **Ronen Bar-Ziv**, Tomer Zidki, [*Angewandte Chemie*](https://onlinelibrary.wiley.com/journal/15213757) **2018**, 130, 16763-16766.
2. **Ronen Bar-Ziv\***, Tomer Zidki, *Journal of coordination chemistry* **2018,** 71 (11-13), 1791-1798.
3. Gadi Benjamini, **Ronen Bar-Ziv**\*, Tomer Zidki, E. J. C. Borojovich, Guy Yardeni, Haya Kornweitz, Dan Meyerstein, *European Journal of Inorganic Chemistry* ***2017*** *(30), 3655-3660*
4. Eitan J.C. Borojovich ,**Ronen Bar-Ziv\***, Olga Oster-Golberg, Hen Sebbag, Michael Zinigradb, Dan Meyerstein, Tomer Zidki, *Applied Catalysis B: Environmental* ***2017****, 210****,*** *255–262*
5. Tomer Zidki, **Ronen Bar-Ziv**, Uri Green, Haim Cohen, Dan Meisel, Dan Meyerstein, *Phys. Chem. Chem. Phys. (PCCP)*, **2014**, 16 (29), 15422.

**Synthesis of Advanced Catalytic Materials Based on Transition-Metal Dichalcogenides for Energy related applications and Pollutant Degradation [1,2,3,6,7,9]**

מחקרים אלו בוצעו במסגרת שיתוף הפעולה שלי עם **פרופ' מאיה בר-סדן** מאוניברסיטת בן-גוריון שהחל במהלך שהותי בשבתון (2016-17), ומתמשך עד היום ואשר כולל פרסום מאמרים והגשת הצעת מחקר חדשה לקרן פזי (2019) ולמשרד האנרגיה והנחיה משותפת של סטודנט לדוקטורט מקמ''ג (אבי בר-חן). במסגרת המחקר מופקים חומרים שכבתיים מתקדמים ונחקרת הפעילות הפוטוכימית והאלקטרו-קטליטית של חומרים אלו לתחומי המרת אנרגיה, כגון: הפקת מימן מפיצול מים (water-splitting), חיזור CO2 לדלקים וגם לפירוק מזהמים. במסגרת עבודה זו סונתזו בין היתר חומרים שכבתיים מבוססי מתכות מעבר TMDs (Transition metal dichalcogenides) כמו MoS2,MoSe2, WSe2, חומרים אשר נחקרו בגלל אפשרות שימושם ההולך וגובר כיום כחומרים קטליטיים זולים יחסית כתחליף למתכות אצילות כמו חומרים ממשפחת הפלטינה. במחקר סונתזו נגזרות שונות של TMDs, ונבדקה הקורלציה בין המבנה ליכולות הקטליטיות לצורך תגובת הפקת מימן במים (HER-hydrogen evolution reaction), תוך שימוש במדידות אלקטרוכימיות של אימפדנס EIS, שיפועי טאפל של עקומות הפולריזציה וזאת במטרה להגיע להבנה טובה יותר של מנגנון הקטליזה [1,6,7] . האתגר היה להתגבר על הקינטיקה האיטית ופוטנציאל היתר ליצירת מימן ב- pH גבוה ובסביבה בסיסית, 2H2O + 2e ⟶ **H2** + 2OH-. תנאים בהם תאי האלקטרוליזה עובדים בגלל עדיפות לתגובת חמצון המים (OER) בצד האנודי לצורך פיצול-מים מלא. במאמר שפרסמנו [3] **בכתב העת המוביל Nanoscale (Impact factor 7) בו הופעתי כמחבר ראשי (PI)** הראיתי כי על ידי שליטה על יחס S/Se בקטליזטור Mo(SxSe1−x)2, ניתן לשלוט על מצב החמצון של המתכת (וה- d band) כפי שנלמד ממדידות XPS ובכך לשפר את הפעילות הקטליטית של חיזור מים להפקת מימן בסביבה בסיסית במנגנון Volmer-Heyrovsky (תוך שיפור שלב קובע הקצב עבור דיסוציאציה של המים באתרים הקטליטיים והקטנת האינטראקציה של יוני הידרוקסיד למניעת הרעלה של הזרז) [3].

במאמרים נוספים שפורסמו בכתבי עת מובילים הוכחנו כי ניתן לשפר את הפעילות הקטליטית, ביצירה של מבנים היברדיים [6] כמו: Cu2-X-MoS2 או באמצעות אילוח (doping) של ה- TMD באמצעות מתכות [1,2], דבר שמשפר הן את ההתנגדות למעבר המטען (charge-transfer) והן את הקישור לאטומי מימן על פני השטח, כפי שנתמך גם בחישובי DFT שבוצעו עם שותפים למחקר [6]. בנוסף הראינו כי ניתן ליצור סביבה מחמצנת ((·OH, O2-·/HO2· המאפשרת פירוק קטליטי של תרכובות אורגניות בתמיסה מימית באמצעות הקרנה באור (פוטוכימיה) של ננו-מבנים המכילים מוליך למחצה-מתכת עם מרווח אנרגיה (band-gap) נשלט [9]. צורנים דומים נוצרים בקרינה (רדיוליזה), כך שהרקע שצברתי מתחום זה אפשר סינרגיה ולהביא את הידע והניתוח המנגנוני למחקרים אלו. כמו כן, בנושאים שפורטו תרמתי בין השאר בגיבוש כיווני מחקר ורעיונות ובפיתוח שיטות אלקטרוכימיות לצורך הבנת המנגנונים הקטליטיים.

**פרסומים בנושא (מס' הסימוכין מתייחס לרשימת הפרסומים המדעיים בקו''ח):**

1. Kuraganti Vasu, Oren E. Meiron, Andrey N. Enyashin, **Ronen Bar-Ziv**, Maya Bar-Sadan, *Journal of Physical chemistry C*, **2019,** 123,1987-1994.
2. Vasu Kuraganti, Akash Jain, **Ronen Bar-Ziv**, Ashwin Ramasubramaniam, Maya Bar-Sadan, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, 11, 28, 25155-25162
3. **Ronen Bar-Ziv\***, Oren E. Meiron, Maya Bar Sadan, *Nanoscale* **2018,** 10 (34), 16211-16216.
4. [Pradipta Sankar Maiti](https://pubs.acs.org/author/Maiti%2C%2BPradipta%2BSankar), [Anal. Kr Ganai](https://pubs.acs.org/author/Ganai%2C%2BAnal%2BKr), [**Ronen Bar-Ziv**](https://pubs.acs.org/author/Bar-Ziv%2C%2BRonen), [Andrey N. Enyashin](https://pubs.acs.org/author/Enyashin%2C%2BAndrey%2BN), [Lothar Houben](https://pubs.acs.org/author/Houben%2C%2BLothar), [Maya Bar Sadan](https://pubs.acs.org/author/Bar%2BSadan%2C%2BMaya), *Chemistry of Materials* **2018,** *30* (14), 4489-4492
5. Oren E. Meiron, Vasu Kuraganti, Idan Hod, **Ronen Bar-Ziv**, Maya Bar-Sadan ,*Nanoscale*, **2017**, 9 (37), 13998-14005
6. [Anal Ganai](http://pubs.acs.org/author/Ganai%2C%2BAnal), [Pradipta S. Maiti](http://pubs.acs.org/author/Maiti%2C%2BPradipta%2BSankar), [Lothar Houben](http://pubs.acs.org/author/Houben%2C%2BLothar), [**Ronen Bar-Ziv**](http://pubs.acs.org/author/Bar-Ziv%2C%2BRonen), [Maya Bar Sadan](http://pubs.acs.org/author/Bar%2BSadan%2C%2BMaya), *J. Phys. Chem. C,****2017****, 121 (12), 7062–7068.*
7. Sunil R. Kadam, Ujjwala V. Kawade, **Ronen Bar-Ziv**, Maya Bar-Sadan, Bharat B. Kaled , *ACS Applied Energy Materials* ***2019****, Accepted*

**To be published: Ronen Bar-Ziv**, Priyadarshi Ranjan, Anna Lavie, Akash Jain, Somenath Garai, Avraham Bar-Hen, Ronit Popovitz-Biro, Reshef Tenne, Raul Arenal, Ashwin Ramasubramaniam, Luc Lajaunie, Maya Bar-Sadan, “[Au-MoS2 hybrids as hydrogen evolution electrocatalysts](https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsaem.9b01147)” *ACS Applied Energy Materials* ***2019****, Accepted.*