

# חישוב גודל דיסקות פריצה בריאקטורים כימיים באמצעות מתודולוגיית DIERS

לקחים מתאונות קטלניות שאירעו בתעשייה הכימית, ממחישים את הצורך ביישום מתודולוגיית DIERS, על מנת להבטיח את אפקטיביות דיסקות הפריצה למניעת פיצוץ הריאקטורים במצבי חירום של יציאת התהליך משליטה

מאת שי שגב



ציר הבוחש שנכנס לתוך המדרכה במרחק של כ-130 מ' מהריאקטור כתוצאה מהפיצוץ



כדור האש שנוצר כתוצאה מהפיצוץ במפעל T2 Laboratories



מיפוי הפגיעות והנזק כתוצאה מהפיצוץ - הבניינים החומים הם בניינים שנהרסו כתוצאה מהפיצוץ והבניינים הצהובים הם בניינים שנפגעו

פיצוץ של ריאקטור כימי וכדור האש שנוצר בעקבותיו גרמו למותם של 4 עובדים ולפציעתם של 32 עובדים נוספים. הפיצוץ אירע בסוף שנת 2007 (19.7.07) במפעל קטן לייצור תוספי דלק של חברת 'T2 Laboratories' בפלורידה ארה"ב. עוצמת הפיצוץ היתה אדירה, מאחר והריאקטור הכיל כמות גדולה של נוזלים דליקים בטמפרטורות ולחץ גבוהים. פיצוץ הריאקטור גרם לשחרור כמות גדולה של אדים וגזים דליקים לסביבה, שהוצתה מיד ויצרה כדור אש ענקי. הפיצוץ אירע בערב חג שבו מספר העובדים במפעל היה מצומצם. בעיתוי אחר הפיצוץ היה יכול להיות קטלני בהרבה.

במהלך הריאקציה של התהליך הוותיק, שפותח עוד בשנות החמישים, ויוצר פעמים רבות במפעל, לא הגיעו מי קירור לקסקדה (מעיל הקירור של הריאקטור) בשל סתימה בקו הכניסה שנגרמה בשל הצטברות אבנית. אי כניסת מי הקירור לקסקדה גרמה לעליית הטמפרטורה בריאקטור וכתוצאה מכך להתרחשות, במקביל לתגובה השגרתית והמוכרת, גם של תגובת פירוק אקזותרמית אלימה - תגובה הפולטת חום וכתוצאה מכך גורמת גם לעליית הלחץ בריאקטור. תגובת פירוק זו לא היתה ידועה לאנשי המפעל מאחר ואינה מתרחשת במהלך התהליך השיגרתי (התגובה התרחשה כתוצאה מעליית הטמפרטורה מעבר לטמפרטורת העבודה השיגרתיות)

הכותב הוא מנהל המרכז לבטיחות תהליכית. דוא"ל: ssegev@cflppi.com

כ-1.6 ק"מ. נזק נגרם למבנים גם במרחק של כ-400 מ' מהמפעל. מעוצמת הפיצוץ נהרגו שני עובדים שהיו בחדר הבקרה של המיתקן (כ-17 מ' מהריאקטור) ושני מפעילים שהיו בקירבת הריאקטור. האירוע גרם כמוכר גם לנזק סביבתי כבד. למרות עבודות השיקום והניקוי שנמשכו חודשים ארוכים, חלק מהנזק היה בלתי הפיך - לרבות זיהום מי התהום בחומרים רעילים כגון בנזן.

## הגורמים העיקריים לתאונה

אנשי המפעל לא היו מודעים לאפשרות של התגובה האקזותרמית המשנית ולאפשרות

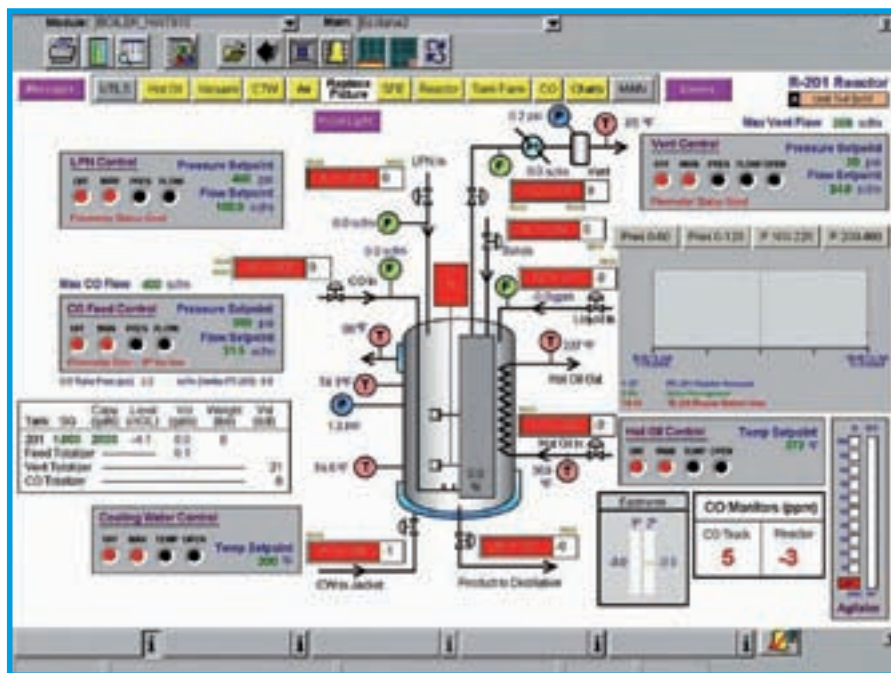
מאחר ודיסקת הפריצה וקו האיסוף שלאחריה לא תוכננו בהתאם למתודולוגיית ה-DIERS (Design Institute for Emergency Relief Systems), פריקת הלחץ לא היתה אפקטיבית: קצב עליית הלחץ בריאקטור היה מהיר הרבה יותר מקצב שחרור הלחץ דרך דיסקת הפריצה, דבר שגרם לבניית לחץ גבוה בריאקטור ולאחר כמספר דקות גם לפיצוץ. עוצמת הפיצוץ שאירע שקולה לפיצוץ של כ-635 ק"ג TNT. חלקים מהריאקטור עפו למרחק של

בצורה איטית, הפתיחה של פורק לחץ או דיסקת פריצה המותקנת על הריאקטור תגרום לשחרורו של הלחץ העודף למקום בטוח כגון מיכל איסוף ייעודי (Blow down drum). אולם, כאשר קצב עליית הלחץ הוא מהיר מאוד, ובד בבד גודל פורק הלחץ או דיסקת הפריצה המותקנת על הריאקטור קטנים מדי - התוצאה עלולה להיות פיצוץ של הריאקטור ושחרור התכולה שלו לסביבה. שחרור זה מלווה לעיתים קרובות בכדור אש ענק הנגרם כתוצאה מהצתת ענן



כיפת הריאקטור העשויה מפלדה בעובי 7.5 ס"מ, עפה למרחק של כ-150 מ', כשהיא פוגעת במהלך מעופה במיכלית שעמדה בסמוך למיתקן

שהתהליך יצא משליטה (כלומר לפוטנציאל ריאקציית Run away). הם ביצעו את כל בדיקות המעבדה בריאקטור של 1 ליטר (כנראה RCI) עבור התהליך השגרתי בלבד, אך לא עבור סטיות אפשריות ממנו (כגון עליית טמפרטורה בשל כשל במערכת מי הקירור, הזנה כפולה של אחד המגיבים וכד'). בגלל נפחו הגדול יחסית של ה-RCI, ואי יכולתו לעמוד בלחצים, הוא איננו מתאים לביצוע בדיקות לתגובות בעלות פוטנציאל Run away. לשם כך ישנם כלים ייעודיים - כגון ה-ARSST וה-VSP2, שפותחו ע"י חברת Fauske שהיא אחת החברות המובילות בעולם בבטיחות תהליכית של מפעלים כימיים וכורים גרעיניים.<sup>\*1</sup>



מסך המחשב של התהליך (החץ - CW בתחתית המסך - מצביע על קו כניסת מי הקירור לקסקדת הריאקטור)

האדים והגזים הדליקים המשתחררים מהריאקטור.

## הצורך בפיתוח מתודולוגיית ה-DIERS

צוות ה-DIERS - לפיתוח מתודולוגיה לחישוב גודל דיסקות הפריצה הנדרש על ריאקטורים, עבור מצבי חירום בהם התגובה הכימית עלולה לצאת משליטה (תרחישי Run away reaction) - הוקם בשנת 1976 ע"י האגודה האמריקאית להנדסה כימית (AIChE). המתודולוגיה פותחה לאור לקחי תאונות קטלניות שאירעו בתעשייה הכימית, וההבנה שהתגבשה אצל מומחים, ששיטת התכנון שהיתה מקובלת באותה תקופה (תכנון לפי תרחיש של אש מסביב לריאקטור) אינה מספקת את ההגנה הנדרשת במצבי חירום, בשל שתי סיבות מרכזיות:

- כאשר משתחררים אדים (שנוצרו כתוצאה מחימום הנוזלים הקיימים בריאקטור), דרך דיסקת הפריצה - הנוזל הנותר בריאקטור מתקרר והתגובה דועכת. לעומת זאת, כאשר משתחררים דרך דיסקת הפריצה גזים שנוצרו כתוצאה מהתגובה

מתודולוגיית ה-DIERS היא כיום המתודולוגיה היחידה בעולם לחישוב גודל דיסקות הפריצה של ריאקטורים כימיים, המקובלת על גורמי המקצוע הבינלאומיים, לרבות הגופים שצינו לעיל. למרבה הצער, למרות שה-OSHA המליץ כבר בשנת 1992 למפעלים כימיים, לבדוק את התאמת מערכות שחרור הלחץ למקרי חירום הקיימות על הריאקטורים שלהם למתודולוגיית ה-DIERS, מעט מאוד נעשה עד היום בנושא זה בארץ.

## יציאה משליטה של תגובה כימית

יציאה משליטה של תגובה כימית מתרחשת בד"כ בגלל חריגות לא מתוכננות אשר מתרחשות בתהליך. בין החריגות אפשר למצוא: כשל של מערכת הקירור (הקסקדה), אובדן בחישה, הזנת יתר של אחד המגיבים, הוספת חומר לא מתאים, זיהום הקיים בחומרי הגלם וכד'.

כאשר התגובה יוצאת משליטה, הלחץ והטמפרטורה בתוך הריאקטור עולים באופן לא מבוקר. אם הלחץ בתוך הריאקטור עולה

המסקנות שעלו מתחקיר האירוע: 1. לא בוצע ניתוח סיכונים ברמה הנדרשת ולכן לא זוהה הסיכון העלול להיווצר במקרה של כשל בכניסת מי הקירור לקסקדת הריאקטור ולא נדרשו אמצעי המגן המתאימים (כגון קו מעקף - Bypass). 2. גודל דיסקת הפריצה ולחץ הפריצה שלה (ה-Set pressure) לא תוכננו בהתאם למתודולוגיית ה-DIERS שנחשבת כ"best practice" ע"י OSHA האמריקאי, ה-HSE הבריטי חברות בינלאומיות, וכד'. ה-CSB (US Chemical Safety Board) שהוא גוף פדראלי בארה"ב האחראי על חקירת תאונות בתעשייה הכימית והפטרוכימית ומפרסם את המימצאים באינטרנט לקהל הרחב במטרה לקדם את הבטיחות ולמנוע הישנותן של תאונות, שכר את חברת Fauske לבצע עבורו בין היתר בדיקות מעבדה וחישוב של גודל ולחץ הפריצה של דיסקת הפריצה שהיה צריך להתקין על הריאקטור לפי מתודולוגיית ה-DIERS. החישוב הראה כי ניתן היה למנוע את הפיצוץ בקלות (לדוגמה: ע"י הורדת לחץ הפריצה של דיסקת הפיצוץ). 3. למפעילים לא היו הנחיות - מסוג "מקרים ותגובות" - לגבי מה שעליהם לעשות במצבי חירום, לרבות בתרחיש של כשל במערכת מי הקירור.

## חשיבות מתודולוגיית DIERS

הלקחים מהפיצוץ הקטלני של הריאקטור במפעל 'T2 Laboratories' ממחישים כי הסיכונים הגלומים בתכנון מערכות שחרור הלחץ בזמן חירום מריאקטורים כימיים (Emergency vents), הנעשה לפי כללי אצבע או לפי שיטות שאינן בעלות תוקף מדעי שנבדק ואושר ע"י גופים בינלאומיים מוכרים (כגון ה-HSE הבריטי ה-OSHA האמריקאי, או האגודה האמריקאית להנדסה כימית - AIChE) עלול לגרום לאסון בקנה מידה נרחב.

\*1 פירוט הניסויים שבוצעו בעזרת מכשירים אלה, בניתוח אופי התגובות במהלך חקירת התאונה, ראו עמודים 53-60 בדו"ח תחקיר האירוע שפורסם ע"י CSB

## קביעת קצב היווצרות הגז וקצב עליית הטמפרטורה

חברת Fauske תכננה וייצרה עבור פרויקט ה-DIERS את הקלוריסטר האדיאבטי הראשון בעולם. "קלוריסטר אדיאבטי" הוא קלוריסטר בו תא הבדיקה בעל קיבול חום נמוך, ולכן אפשר לדעת בדיוק רב כמה חום נפלט מהריאקציה בכל רגע נתון. תהליך אדיאבטי הוא תהליך הכולל דחיסה והתפשטות של גז ללא כניסת חום למערכת או יציאתו ממנה. התהליך יוצר חום בגלל החיכוך והלחץ שנוצר בין מוליקולות הגז. בקלוריסטר כזה ניתן לבצע סימולציה של יציאת תגובה משליטה (Run away reaction), בסביבה אדיאבטית המדמה את תנאי התהליך האמיתיים. אחד החידושים המרכזיים בקלוריסטר זה, היה מקדם המובילים נמוך של כלי הבדיקה (test cell). כלומר: כלי בדיקה דק וקל משקל בעל קיבול חום נמוך, אשר הנתונים המתקבלים ממנו יכולים לשמש ישירות ליישום בסקלה תעשייתית (scale up). לימים נקרא קלוריסטר זה בשם VSP (Vent Sizing Package).

מכשיר ה-ARSST (Advanced Reactive Screening Tool) פותח לאחר מכן, במטרה לשמש כתחליף פשוט וזול ל-VSP, אך הוא אינו מכיל את כל הפונקציות והאפשרויות של ה-VSP. ה-VSP הוא מכשיר מתוחכם ויקר ונחשב כ-"Best available practice" בעוד שה-ARSST נחשב כ-"minimum best practice", אך הוא הרבה יותר פשוט להפעלה וזול יותר (עלותו כ-35,000 דולר בלבד).

### VSP2 - Vent Sizing Package

ה-VSP2 הוא למעשה ריאקטור מעבדתי הנתון בתוך כלי מגן. ניתן להכניס את חומרי התגובה בכל זמן במהלך הריאקציה וכן ניתן לדגום או להוציא גזים ונוזלים בכל רגע במהלך הניסוי. נפח כלי התגובה הגדול יחסית - יכול להכיל עד כ-80 מ"ל חומרי תגובה - מספק דוגמה מייצגת יותר כמו גם דיוק טוב יותר בעת הוספת קטליזטורים. את הטמפרטורה ניתן למדוד

## השלבים הנדרשים בחישוב גודל דיסקת הפריצה לפי מתודולוגיית DIERS

1. קביעת תרחיש הייחוס (worst credible scenario). את תרחיש הייחוס יש לבנות בהתבסס על הבנה מעמיקה של התהליך, התנאים והמצבים, שבהם עלולה להיות סטייה מהתהליך הרצוי ושל הגורמים העלולים לגרום לעליית הלחץ בריאקטור. בבניית תרחיש הייחוס צריך לקחת בחשבון שיכול להיות מצב בו מספר אירועים יתרחשו במקביל, לדוגמה: תקלה במערכת החשמל יכולה לגרום גם לסגירת ברז אספקת מי הקירור לקסקדת הריאקטור, וגם להפסקת פעולת המפוח של מגדל הספיגה אליו מחובר הריאקטור.
2. קביעת הנתונים הפיזיקליים הנדרשים לצורך ביצוע החישוב.
3. סיווג הריאקציה בתנאי תרחיש הייחוס כריאקציה אדית (Vapor) - שהיא ריאקציה שבה עליית הלחץ נגרמת כתוצאה מאיבוד הנוזלים בשל עליית הטמפרטורה; או כריאקציה גזית - שבה עליית הלחץ נגרמת ע"י גזים הנוצרים במהלך התגובה; או כריאקציה היברידיה - שבה הלחץ עולה הן מיצירת גזים במהלך התגובה והן כתוצאה מאיבוד הנוזלים בשל עליית הטמפרטורה.
4. קביעת קצב היווצרות הגז (במערכת גזית) או קצב יצירת החום (במערכת בה מתרחשת ריאקציה אדית) עבור הריאקציה בתנאי תרחיש הייחוס. קביעה זו מתבצעת במעבדה בעזרת כלים ייעודיים שהנפוצים שבהם הם ה-ARSST וה-VSP2 (ראו פירוט בהמשך).
5. חישוב בעזרת תוכנות מתאימות (כגון תוכנת ה-RMS של חברת Fauske) של גודל דיסקת הפריצה האידיאלי.
6. חישוב מפל הלחץ בקו האיסוף מפורק הלחץ (back pressure) וקביעת גודל דיסקת הפריצה הנדרש בהתאם.
7. כאשר קיימים חומרים צמיגיים מאוד (מעל 500 cp) או חומרים בעלי זרימה למינארית בקו הפריצה - יש להתייעץ עם מומחים מאחר ויידרשו התאמות משמעותיות בגודל הדיסקה.

הכימית - טמפרטורת הנוזל הנוטר בריאקטור אינה יורדת וקצב התגובה אינו קטן.

● הזרימה דרך דיסקת הפריצה היא ברוב המקרים דו-פאזית. כלומר: ישנה זרימה של תערובת של נוזל וגז, בדומה לזרימה המתקבלת מפתח בקבוק שמפנייה או קולה לאחר שניערו אותו היטב. מאחר ובזרימה דו-פאזית הנוזל מפריע לזרימת הגז, יש צורך בדיסקת פריצה גדולה הרבה יותר מאשר אילו היתה זרימה חד-פאזית. במקרים מסוימים מתקבלת זרימה דו-פאזית - מאחר ובמהלך ריאקציה כימית מתרחשת רתיחה בכל נפח הנוזל הקיים בריאקטור, ולא רק על גבי שטח הפנים. כל בועת גז שנוצרת תופסת נפח ודוחקת את הנוזל כלפי מעלה. כאשר נוצרת כמות גדולה של בועות, גובה הנוזל יגיע עד לדיסקת הפריצה ותתרחש דרכה זרימה דו-פאזית.

## תוצאות הצוות לפיתוח מתודולוגיית ה-DIERS

בצוות ה-DIERS נכללו כ-29 חברות בינלאומיות (ביניהן חברת Fauske שביצעה את כל הניסויים וריכזה את כתיבת הדו"ח) עלות הניסויים היתה כ-1.6 מיליון דולר (בערכי שנות השבעים). לצוות ה-DIERS היו מספר תוצרים חשובים:

1. הבנת תופעת הזרימה הדו-פאזית והתנאים שבהם היא מתרחשת.
2. פיתוח מודלים לחישוב גודל דיסקת הפריצה הנדרשים בתרחישים השונים. החל מ-1986 קיימת קבוצת DIERS Users Group בה חברים נציגים של יותר מ-250 חברות מהמובילות בתחום הבטיחות בעולם שיעודה להמשיך ולפתח את המתודולוגיה.
3. התייחסות התקנה לניהול בטיחות תהליכית של OSHA (Occupational Safety and Health Administration): היא המינהל לבטיחות ולבריאות העובדים בארה"ב, שתפקידו למנוע תאונות עבודה ומחלות מקצוע ע"י הכנה, פרסום ואכיפה של תקנות בנושאי בטיחות וגיהות. במסגרת התקנה לניהול בטיחות תהליכית (PSM) שפורסמה בשנת 1992 (Process Safety Management regulation CFR 1910.119), הכירה OSHA בדו"ח המסכם שפרסם צוות ה-DIERS, כתקן הנדסי מחייב, בשל היותו "הטכנולוגיה הטובה הזמינה ביותר" ("best available practice"). על כן, היא דרשה ממפעלים כימיים לבדוק את התאמת קווי דיסקות הפריצה הקיימים על גבי הריאקטורים שלהם למתודולוגיית ה-DIERS (re-evaluation of the size and capacity) of the emergency relief system using the methodology of the AIChE's Design (Institute for Emergency Relief Systems



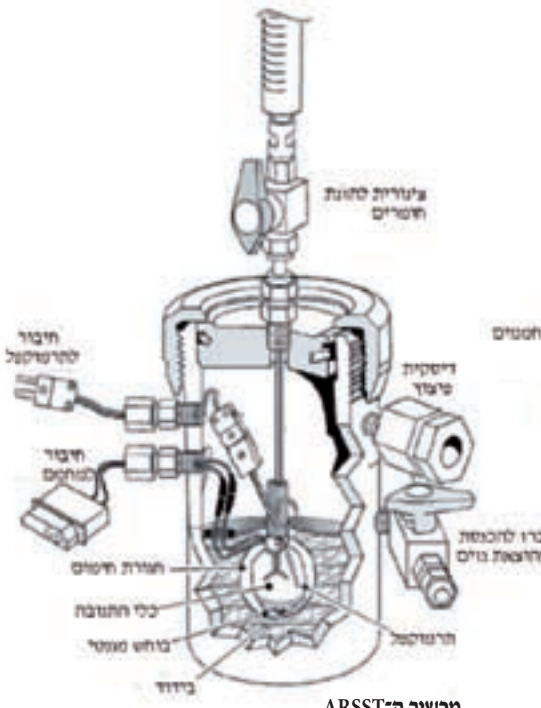
דיסקת פריצה (באדיבות Fike Europe)

## מקורות נוספים לקריאה

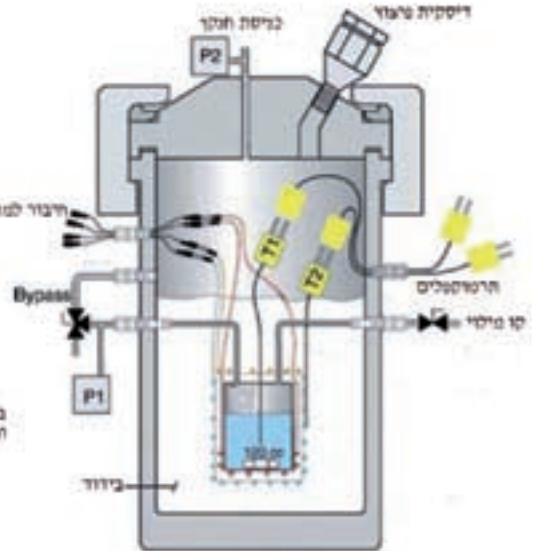
1. Workbook for chemical reactor relief system sizing – HSE (Health and safety Executive,UK) – [http://www.hse.gov.uk/research/crr\\_pdf/1998/crr98136a.pdf](http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/1998/crr98136a.pdf)

2. התקנה לניחול בטיחות תהליכית של משרד העבודה האמריקאי (OSHA): [http://63.234.227.130/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9760](http://63.234.227.130/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9760)

3. Emergency Relief System Design Using DIERS Technology: The Design Institute for Emergency Relief Systems (DIERS) Project Manual (Diers Project Manual), H. G. Fisher, Wiley-AIChE 1993



מכשיר ה-ARSST



מכשיר ה-VSP2

## טבלת השוואה בין מכשיר ה-ARSST לבין מכשיר ה-VSP2

Calorimeter	VSP2	ARSST
Developed in:	1985 (VSP)	1989 (RSST)
DIERS Technology:	Yes	Yes
Suitable for Vent Sizing:	Yes	Yes
Phi-Factor (for typical organic):	1.09	1.05
Directly Scalable:	Yes	Yes
Test Cell:	Cylinder, 116 ml	Sphere, 5 to 20 ml
Test Cell Material (for low-phi testing):	SS, Glass, Ti, Hast C	Glass
Sample Size (typical):	Up to 100 ml (80 g)	4 to 16 ml (5 to 20 g)
Sample Type:	Liquids, solids, 2 phase	Liquids, solids
Open cell testing:	Yes	Yes
Closed cell testing:	Yes	Yes (add-on option)
Containment Vessel Volume:	4 liter	350 or 450 ml
Pressure Range:	FV - 1900 psi (130 bar)	FV - 1000 psi (70 bar)
Pressure Channels:	Four	One
Automatic Pressure Balancing (closed cell):	Yes	No (manual)
Temperature Range (standard setup):	-100 to 1200°C	-70 to 700°C
Temperature Tracking:	600°C/min	200°C/min
Temperature Measurements (in sample):	Up to three	One
Exotherm Detection Sensitivity:	0.05°C/min	0.1°C/min
Data logging frequency:	100 points/sec	1000 points/sec
Magnetic Agitation:	Yes	Yes
Available baffled test cells & star stir bar:	Yes	No
Mechanical Agitation:	Yes (add-on option)	No
Heater Operation:	Pulsing voltage	Continuous power
Dedicated Guard Heater balances heat loss:	Yes ("true adiabatic")	No
Test Cell Heater compensates heat loss:	No	Yes ("adiabatic plus")
Automatic Heat-Wait-Search (HWS):	Yes	No
Isothermal Hold (aging) Experiments:	Yes	Yes
External Cooling Coil:	Yes (with kit)	No
Dosing (Injection):	Yes	Yes
Convenient In-Situ Liquid-Gas Sampling:	Yes	No
Flow Regime Detector (foamy/non-foamy):	Yes (add-on option)	Yes (add-on option)
Test Cell Blowdown Experiments:	Yes	No
Available Scan Rate (fire heat simulation):	Up to 20°C/min	Up to 30°C/min
Usual Mode of Operation:	Adiabatic, HWS, scan	Thermal scan, 2°C/min
Setup Time (typical):	2 hrs	20 min

בשלושה מקומות בכלי הבדיקה. זוהי אופציה חשובה כאשר בודקים מוצקים או נוזלים בלתי מסיסים.

לצורך בחישה אופטימלית של ריאקציות עם מספר פאזות (כגון אמולסיות, תרחיפים בתצורות שונות), ניתן להשתמש בכלי תגובה עם "באפלים" (חוצצים) ועם בוחש מכני או בוחש מגנטי בצורת כוכב.

ה-VSP2 מתאים בעיקר לתגובות שבהן קיימים פולימרים או מספר פאזות בגלל הבחישה הטובה ובדיקת לחץ האדים הרציפה.

### ARSST - Advanced Reactive Screening Tool

טכנולוגיית ה-ARSST פותחה על מנת לשמש כ"קיצור דרך" קל וזול לטכנולוגיית ה-VSP. היא נועדה בעיקר עבור משתמשים שביצוע הניסויים אינו עיקר עיסוקם והתמחותם. הניסויים ב-ARSST מבוצעים כאשר כלי הבדיקה פתוח (open cell mode). בשיטה זו נמנעת יצירת האדים (רתיחה) ע"י לחץ חנקן. הלחץ שנוצר כתוצאה מיצירת הגז נמדד בכלי החיצוני. זוהי השיטה המומלצת למערכות גזיות.

במהלך הניסוי ניתן להכניס נוזלים לתא הבדיקה של ה-ARSST, תוך שימוש בצינורית הזנה. הבחישה נעשית בעזרת בוחש מגנטי. ל-ARSST ישנם מספר יתרונות על פני ה-VSP:

- הוא זול יחסית (כ-35,000 דולר בלבד).
- עלות הציוד המתכלה הנדרש זולה יחסית (פחות מ-80 דולר בממוצע לניסוי).
- כמות החומר הנדרש לביצוע הניסוי היא קטנה (רק מספר גרמים בודדים). הנפח האופייני של סך כל חומרי התגובה הוא 10 מ"ל. דבר זה מהווה יתרון בשלבי הפיתוח הראשוני כאשר כמויות החומר הזמינות קטנות.
- הזמן הנדרש להכנה לניסוי ולניקוי לאחריו קצר יותר. ■