

התפשטות חופשית של גזים - סיכונים

דף מידע מאת: זהר שטרן

מבוא

במתקני גז, כתוצאה מכשל, קורה לא פעם שגז מתפרץ לאוויר. מתברר שהגז, גורם להתקררות או להתחממות באזור הקרוב למקום ההתפרצות, הדבר תלוי בסוג הגז שבמתקן. לפיכך יש להיזהר מפני כוויית קור או במידה והגז נפיץ, להתפוצצות מואצת כתוצאה מהתחממות. דוגמה לגז המתקרר עם התפרצותו מצנרת – אוויר דחוס וסכנה להתפוצצות של גז המתחמם, היא של גז מימן.

נשאלת השאלה המסקרנת והמתבקשת, למה גז מסוים בעת התפרצותו מתקרר והאחר מתחמם? בסקירה זו ננסה להסביר תופעה זו הידועה על שם המדענים שחקרו אותה - אפקט ג'אול-תומסון.

אפקט ג'אול-תומסון (או גם בשם ג'אול-קלווין) הידוע מעולם התרמודינמיקה, הוא תהליך בו כתוצאה מהתפשטות חופשית של גז אידיאלי, הטמפרטורה אינה משתנה בעוד שהטמפרטורה של גז ריאלי עשויה לרדת או לעלות בתנאי שלא חל שינוי באנתלפיה (כלומר במקרה ואין מעבר חום מהגז לסביבה ולהיפך וכן ולא נעשית כל עבודה חיצונית כתוצאה מהתפשטות זו).

אפקט זה כאמור נקרא על שם החוקרים והמגלים אותו בשנת 1852, ג'אול ותומסון, שהראו שבתהליך התפשטות של גז אין שינוי באנרגיה הפנימית שלו.

תיאור

הקשר בין טמפרטורה, לחץ, ונפח עבור גז מתואר בצורה פשוטה באמצעות חוקי הגזים השונים. אולם כאשר הנפח גדל בתהליך בלתי הפיך חוקי הגזים, אינם יכולים בצורה ייחודית, לקבוע מה יקרה ללחץ ולטמפרטורה של הגז. בתהליך איזנטרופי (בו אין שינוי באנטרופיה) בו הגז מבצע עבודה חיובית בתהליך ההתפשטות תמיד נגרמת ירידה בטמפרטורה.

אולם כאשר גז ריאלי (הנבדל מגז אידיאלי) מתפשט באופן חופשי באנתלפיה קבועה, הטמפרטורה יכולה לרדת או לעלות, הכל תלוי בנתוני הלחץ והטמפרטורה ההתחלתיים של הגז. עבור כל גז ריאלי הנמצא בלחץ נתון קיימת טמפרטורת היפוך של ג'אול-תומסון (**Joule-Thomson inversion temperature**), שמעליה בעת התפשטות באנתלפיה קבועה הטמפרטורה של הגז עולה כלומר הגז מתחמם ושמתחתיה בעת התפשטות באנתלפיה קבועה הטמפרטורה שלו יורדת והגז מתקרר. עבור רוב הגזים בלחץ אטמוספרי, טמפרטורת ההיפוך בבירור גבוהה (מעל טמפרטורת החדר) ולכן רוב הגזים בתנאי טמפרטורה ולחץ אלה יתקררו בתהליך התפשטות איזאנתלפי (ללא שינוי בתכולת החום).

מקדם ג'אול-תומסון

השינוי של הטמפרטורה כתלות בשינוי בלחץ של גז ריאלי בתהליך התפשטות איזאנתלפי הוא מקדם ג'אול-תומסון - μ_{JT} ו מבוטא באופן הבא:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

ערך זה ניתן גם לחישוב בעזרת הנוסחה הבאה:

$$\mu \equiv \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{V}{C_P} (T\alpha - 1),$$

כאשר:

T - טמפרטורת הגז

P - לחץ הגז

V - נפח הגז

C_P - החום הסגולי בלחץ קבוע

α - מקדם ההתפשטות התרמי

הערך μ מבטא ביחידות של K/Pa (קלווין לפסקל) ותלוי בגז המסוים וכן בלחץ ובטמפרטורה שלו לפני ההתפשטות.

מתברר שעבור כל הגזים הריאליים, בערכים נתונים מסוימים של לחץ וטמפרטורה, ערך המקדם של ג'אול-תומסון מתאפס ונקרא **נקודת ההיפוך**. כפי שהוסבר קודם לכן נקודת ההיפוך של ג'אול-תומסון היא אותה הטמפרטורה בה מקדם ג'אול-תומסון משנה את סימנו מחיובי לשלילי (כלומר בנקודה זו ערכו – אפס). טמפרטורת ההיפוך של ג'אול-תומסון תלויה בלחץ ההתחלתי של הגז לפני ההתפשטות.

בכל תהליך התפשטות של גז, לחץ הגז קטן ולכן הסימן של ∂P תמיד יהיה שלילי. בתאם לכך, הטבלה שלהלן מראה מתי ייגרם בהתאם לאפקט ההתפשטות של ג'אול-תומפסון - קירור או חימום.

לכן הגז חייב:	לכן ∂T חייב להיות:	היות ו ∂P הוא תמיד	המקדם μ יהיה:	אם טמפרטורת הגז היא:
להתקרר	שלילי	שלילי	חיובי	מתחת לטמפרטורת ההיפוך
להתחמם	חיובי	שלילי	שלילי	מעל טמפרטורת ההיפוך

הגזים מימן, הליום וניאון הם בלחץ אטמוספרי בעלי טמפרטורות היפוך נמוכות מאד בהתאם לנתון בטבלה הבאה:

סוג הגז	טמפרטורת ההיפוך [K°]
מימן	202
הליום	40
ניאון	231
חנקן	621
חמצן	764

לכן מימן והליום יתחממו בהתפשטות חופשית, בעוד אוויר המורכב בעיקר מחמצן וחנקן יתקרר בתהליך זה של אנתלפיה קבועה. בתנאים רגילים (לחץ אטמוספרי וטמפרטורה השוררת בחדר).

חייבים להדגיש שהערך μ עבור גז אידיאלי יהיה תמיד שווה לאפס (כלומר גזים המוגדרים אידיאליים לא יתחממו ולא יתקררו בתהליך התפשטות באנתלפיה קבועה).

הסבר המנגנון הפיזיקלי

במקרה של התקררות יוצא לפועל המנגנון הבא: כאשר גז מתפשט, בדומה לקפיץ שנמתח, המרחק הממוצע בין המולקולות גדל. בגלל כוחות משיכה בין-מולקולאריים, ולכן ההתפשטות גורמת להעלאת האנרגיה הפוטנציאלית של הגז. אם אין תוספת של עבודה חיצונית בתהליך (התפשטות חופשית) וכן אין העברת חום, אזי האנרגיה הכללית של הגז נשארת קבועה ומקיימת את חוק שימור האנרגיה. העלייה באנרגיה הפוטנציאלית משמעותה ירידה באנרגיה הקינטית ומכאן נובע גם ירידה בטמפרטורה.

המנגנון השני של חימום הגז, הוא בעל אפקט הפוך. בזמן התנגשות של המולקולות אלו באלו, בדומה למנגנון הקודם, אנרגיה קינטית באופן זמני הופכת לאנרגיה פוטנציאלית. אולם היות וממוצע המרחק הבין-מולקולארי גדל, חלה ירידה משמעותית במספר ההתנגשויות של המולקולות אלו באלו ליחידת זמן, דבר הגורם בסיכום הכללי לירידה באנרגיה הפוטנציאלית. שוב, היות והאנרגיה הכללית נשמרת, חלה עליה באנרגיה הקינטית שמשמעותה עליה בטמפרטורה של הגז.

לכן במנגנון הראשון, התפשטות חופשית של הגז, כאשר הטמפרטורה היא מתחת לטמפרטורת ההיפוך של ג'אול-תומסון (נעשית עבודה פנימית כנגד כוחות המשיכה הבין-מולקולאריים) תחול התקררות של הגז. אולם אם ההתפשטות חלה בטמפרטורה שהיא מעל לטמפרטורת ההיפוך יחול המנגנון השני (הפחתה במספר ההתנגשויות, הגורמת לירידה באנרגיה הפוטנציאלית) שמשמעותה התחממות הגז.

יישומים

להלן מספר יישומים מעשיים לתופעה שהתגלתה על ידי ג'אול ותומסון וזאת אם התנאים הבאים מתקיימים:

- מתאפשר לגז הריאלי להתפשט דרך התקן משנק (בדרך כלל שסתום) החייב להיות מבודד היטב כדי למנוע מעבר חום.
- אין לאפשר לגז לבצע עבודה חיצונית בזמן תהליך ההתפשטות.

האפקט מיושם במכונת לינדה (ע"ש ממציאה) להנזלת גזים, כתהליך סטנדרטי בתעשייה הכימית, לדוגמה כאשר אפקט הקירור מנוצל להנזלת גזים וכן ביישומים קריאוגנים רבים (לדוגמה בתהליך ייצור של חמצן חנקן וארגון נוזלי). רק כאשר מקדם ג'אול-תומסון עבור גז מסוים הנמצא בטמפרטורה מסוימת גדול מהערך אפס, ניתן יהיה בטמפרטורה זו להנזילו באמצעות מחזורי התפשטות ודחיסה במכונת לינדה. במילים אחרות, הגז צריך להיות מתחת לטמפרטורת ההיפוך שלו, כך שניתן יהיה להנזילו במחזור לינדה. מסיבה זו מכונת לינדה פשוטה המשמשת להנזלת גזים אינה יכולה בדרך כלל לשמש להנזלת הגזים: מימן הליום או ניאון, אלא אם כן הם מקוררים בשלב מקדים אל מתחת לטמפרטורת ההיפוך שלהם.

זהר שטרן - מרכז מידע של המוסד לבטיחות ולגיהות