تحقیق و توسعه مواد پرانرژی

سال چهاردهم- شماره ۲- شماره پیاپی ۳۲- پاییز و زمستان ۱۳۹۷

تجمع الکتریسیته ساکن در سوخت‌های مایع، اندازه‌گیری و کنترل آن

شهرام قنبری پاکدهی[1*]، حمیدرضا تفضلی نیا[2]، سجاد رضایی[3]، منوچهر فتح الهی[4]

۱- دانشیار، ۲- کارشناس ارشد، ۳- دکتری، ۴- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

***Email: sh_ghanbari73@yahoo.com**

(تاریخ وصول: ۹۸/۶/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۲۵)

چکیده

سوخت‌های مایع به‌طور معمول هدایت الکتریکی پایینی دارند که سبب تجمع الکتریسیته ساکن حین فرآیندهای انتقال، اختلاط و پاشش در آن‌ها می‌گردد. این تجمع بار در صورتی که بیش از انرژی یونیزاسیون هوا گردد سبب جرقه و آتش‌سوزی خواهد شد. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در ایمنی سوخت‌ها، بررسی پتانسیل آن‌ها نسبت به تجمع بار ساکن می‌باشد. در این مقاله مواد نسبت به الکتریسیته ساکن دسته‌بندی و نحوه تولید، تجمع، تخلیه و پخش بار الکتریکی در سوخت‌های مایع بررسی شده است. سپس راهکارهای کنترل الکتریسیته ساکن در مایعات پرانرژی نارسانا ارائه شده است. درنهایت روش‌های متداول اندازه‌گیری الکتریسیته ساکن شرح داده شده است.

واژه‌های کلیدی: سوخت مایع، الکتریسیته ساکن، هدایت الکتریکی.

Accumulation of Static Electricity in Liquid Fuels, Measurement and Control

S. Ghanbari Pakdehi*, H. R. Tafazoli Nia, S. Rezaei, M. Fathollahi

Maleke Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 09/07/2019, Accepted:12 /16/2019)

Abstract

Liquid fuels usually have low electrical conductivity leads to accumulating in static electricity during transmission, mixing and spraying processes. This charge accumulation will spark and fire if it exceeds the air ionization energy. Therefore, one of the important parameters in fuels safety is their potential for static charge accumulation. In this manuscript, materials are classified into static electricity and the mode of generation, accumulation, discharge and distribution of electric charge in liquid fuels will be investigated. Then, solutions for static electricity control in low conductivity high energetic liquids presented. Finally, common methods of measuring the static electricity presented.

Keywords: Liquid Fuels, Static Electricity, Electrical Conductivity.

۱- مقدمه

تولید الکتریسیته ساکن یک پدیده اجتناب ناپذیر در بیشتر فرآیندهای صنعتی است. شایع‌ترین ایجاد کننده الکتریسیته ساکن فرآیندهایی هستند که شامل مایعات قابل اشتعال و هدایت الکتریکی پایین می‌باشند. مایعات با هدایت الکتریکی پایین، مستعد تولید و تجمع الکتریسیته ساکن تحت شرایط خاصی است. این شرایط خاص شامل مایعات و جامدات مخلوط نشدنی مثل دوغاب‌ها، پخش گاز در مایع، تعلیق جامدات، امولسیون‌ها، عبور جریان از فیلترها، صافی‌ها، پمپ‌ها و پاشنده‌ها، همزدن و مخلوط کردن مایعات است[۱]. در نگاه اول ایجاد الکتریسیته ساکن در سیالات به نظر مسئله ساده و کم اهمیتی جلوه می‌کند ولی با گزارش شدن موارد متعدد آتش‌سوزی و انفجار در تانکرهای حامل سوخت‌های مایع در سراسر جهان، با وجود داشتن زنجیر اتصال به زمین، اهمیت پرداختن به این موضوع آشکار شده است. علت این پدیده به این مسئله برمی‌گردد که زمانی که رسانایی الکتریکی سوخت پایین باشد، بار الکتریکی ایجاد شده تجمع می‌یابد تا زمانی که پتانسیل ذخیره شده در آن سوخت به حدی برسد که بتواند هوای بالای خود را یونیزه کند. در این حالت الکتریسیته ذخیره شده ناگهان به صورت یک جرقه تخلیه شده و موجب اشتعال و انفجار هوای بالای سوخت که مملو از بخارات اشتعال پذیر است می‌شود[۲]. این پدیده دلیل اصلی آتش‌سوزی و انفجار در بسیاری از صنایع است[۱]. در این مقاله ابتدا تقسیم‌بندی مواد موجود نسبت به الکتریسیته ساکن آورده شده سپس نحوه تولید، تجمع، تخلیه و پخش بار الکتریکی در سوخت‌های مایع ارائه شده است. پس از آن راه‌های ایجاد و کنترل الکتریسیته ساکن در سوخت‌های مایع بیان می‌شوند. درنهایت روش‌های اندازه‌گیری میزان الکتریسیته ساکن و هدایت الکتریکی سوخت مایع ارائه می‌شوند.

۲- تقسیم بندی مواد موجود در طبیعت نسبت به الکتریسیته ساکن

میزان شارژ و یا انتقال الکترون از یک ماده به ماده دیگر به عواملی چون نوع ماده، سطح تماس، سرعت جدا شدن و رطوبت محیط بستگی دارد. مواد موجود در طبیعت از نظر الکتریسیته ساکن به مواد عایق، نیمه رسانا و هادی تقسیم می‌شوند[۳]. شاخص کمی برای این دسته‌بندی، میزان هدایت الکتریکی (σ) است که واحد آن زیمنس بر متر (S/m) یا پیکوزیمنس بر متر (pS/m) است. هدایت الکتریکی شاخص اصلی جنبش یون‌ها در مایعات است. لازم به ذکر است که مقدار بار تولید شده در طی استفاده از یک مایع، فاکتوری از جنبش یون‌های مایع است.

طبق استاندارد NFPA 77، مایعاتی که هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰ پیکو زیمنس بر متر (pS/m) داشته باشند مثل تولوئن تصفیه شده، دی اتیل اتر و بسیاری از سوخت‌های مایع دارای گوگرد پایین، به‌عنوان مایعات عایق یا نارسانا، مایعاتی نظیر بوتیل استات دارای هدایت الکتریکی بیش از ۱۰۰۰۰ پیکو زیمنس بر متر به‌عنوان مایعات رسانا و مایعاتی مانند تولوئن که دارای هدایت الکتریکی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ پیکو زیمنس بر متر باشند به‌عنوان مایعات نیمه رسانا دسته‌بندی می‌شوند. هدایت الکتریکی برخی از مایعات در جدول (۱) آورده شده است[۱].

جدول ۱- هدایت الکتریکی برخی مایعات[۱].

مایع	هدایت الکتریکی (pS/m)
اتیل استات (۲۵ °C)	$۴/۶\times۱۰^{۴}$
اتیلن گلیکول	$۱/۱۶\times۱۰^{۹}$
تری کلرو اتیلن	۸۰۰
متیلن کلرید	۴۳۰۰
کروسن (سوخت جت)	۰/۲-۱۰۰
گازوئیل	۰/۳-۱۰
نفتا	۰/۴۹

۳- حداقل مقدار انرژی اشتعال گازها و بخارها

حداقل مقدار انرژی اشتعال، برای ارزیابی خطرات در یک واحد که از مواد قابل اشتعال استفاده می‌کنند مهم است. می‌توان از آن به‌عنوان یک راهنما برای تعیین اقدامات حفاظتی که باید انجام شود استفاده کرد و همچنین یک درک عمومی از اشتعال توسط الکتریسیته ساکن را فراهم می‌کند. حداقل مقدار انرژی اشتعال یک ماده قابل اشتعال، کمترین انرژی الکتریکی است که در یک خازن ذخیره شده و موقع تخلیه باعث آتش‌سوزی ماده در شرایط آزمون خواهد شد[۴].

شکل (۱) حداقل مقدار انرژی اشتعال را نشان می‌دهد که در نزدیکی محدوده پایین و بالای اشتعال به سرعت افزایش می‌یابد. بین این دو مقدار (محدوده پایین و بالای اشتعال)، حداقل مقدار انرژی اشتعال وابسته به غلظت بخارهای قابل اشتعال است.

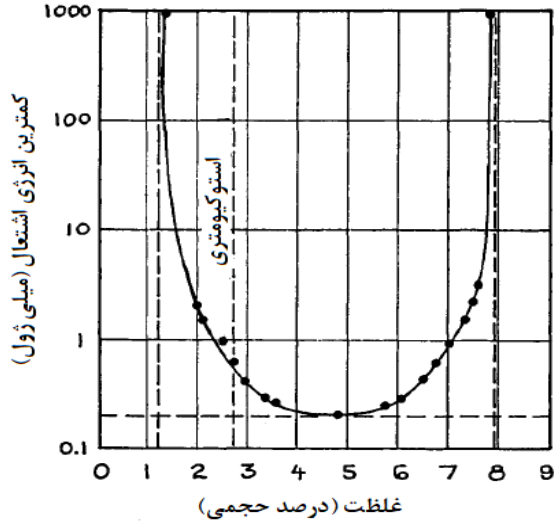
مقدار انرژی برای احساس شوک (زمانی که یک شخص شوکی را احساس می‌کند) تقریباً ۱/۰ میلی ژول برای اکثر مردم است. این یعنی اینکه جرقه الکتروستاتیکی که یک شخص ممکن است احساس نکند، می‌تواند انرژی لازم برای آتش‌سوزی بخارات قابل اشتعال باشد (حداقل مقدار انرژی بخارات حلال‌ها بین ۰/۱ تا ۱/۰ میلی ژول است)[۵]. حداقل مقدار انرژی برخی گازها و بخارت در جدول (۲) آمده است.

باید دانست که حداقل مقدار انرژی با دما، فشار یا محیط مختلفی تغییر می‌کند. بنابراین، اگر سامانه‌ای در دما، فشار یا محیط مختلفی باشد باید حداقل مقدار انرژی متفاوتی را برای چنین شرایطی در نظر گرفت.

• حداقل مقدار انرژی برای یک مخلوط گازی با فشار به‌طور معکوس تغییر می‌کند. کاهش فشار منجر به افزایش در حداقل مقدار انرژی می‌شود (جدول (۳)).

• حداقل مقدار انرژی برای یک مخلوط گازی به‌طور معکوس با دما تغییر می‌کند. افزایش دما منجر به کاهش حداقل مقدار انرژی می‌شود (جدول (۴)).

• اگر محیط اطراف چیزی جز هوا باشد، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در حداقل مقدار انرژی اشتعال وجود دارد. برای مثال، افزایش غلظت اکسیژن باعث کاهش در حداقل مقدار انرژی اشتعال یک سوخت مشخص می‌شود (جدول (۵)).



شکل ۱- حداقل مقدار انرژی اشتعال به‌عنوان تابعی از غلظت بنزن[۴].

جدول ۲- حداقل مقدار انرژی گازها و بخارها ساطع شده از مایعات[۴].

سوخت	حداقل مقدار انرژی اشتعال (mJ)
هیدروژن سولفید	۰/۰۶۸
اتیلن	۰/۰۷
دی اتیل اتر	۰/۱۹ در ۵/۱ درصد
پروپان	۰/۲۵ در ۵/۲ درصد
متانول	۰/۱۴ در ۱۴/۷ درصد
متیل بوتان	۰/۲۵
متیل فرمات	۰/۴

جدول ۳- حداقل مقدار انرژی اشتعال برخی هیدروکربن‌های نسبت به فشار (در دمای ۲۵ درجه سلسیوس)[۴].

فشار، (اتمسفر، (atm	حداقل مقدار انرژی اشتعال (میلی ژول، mj)		
	متان	اتان	پروپان
۱	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۲۶
۰/۵	۱/۴	۰/۶۶	۰/۷۰
۰/۲۵	۷/۰	۴/۵	۵/۵

جدول ۴- حداقل مقدار انرژی اشتعال برخی گازها و بخارها در دمای ۲۵ و ۱۵۰ درجه سلسیوس (در هوا و فشار محیط)[۴].

سوخت	۲۵ °C	۱۵۰ °C
استون	۰/۴۰۶	۰/۱۸۸
دی اتیل اتر	۰/۲۵	۰/۰۸۹
اتیلن	۰/۱۲۱	۰/۰۶۲

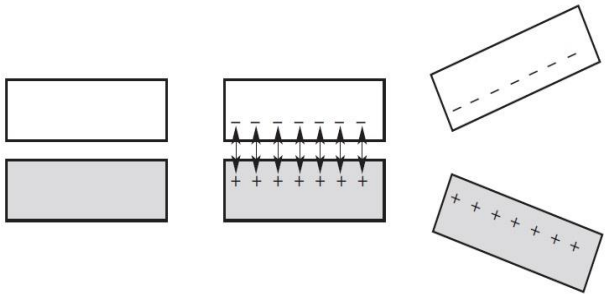
جدول ۵- حداقل مقدار انرژی اشتعال برخی سوخت‌ها در محیط هوا و اکسیژن (در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۵ °C)[۴].

سوخت	حداقل مقدار انرژی احتراق (میلی ژول، mj)		
	هوا	اکسیژن	نسبت هوا به اکسیژن
استون	۱/۱۵	۰/۰۰۲۴	۴۷۹
استیلن	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۲	۸۵
نرمال بوتان	۰/۲۵	۰/۰۰۹	۲۸

۴- نحوه تولید، تجمع، تخلیه و پخش بار الکتریکی در سوخت‌های مایع

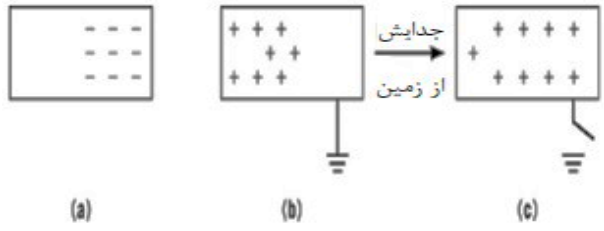
۴-۱- تولید بار

تعداد الکترون‌ها و پروتون‌های یک اتم در حالت خنثی برابر است. بنابراین، اتم در حالت عادی از نظر بار الکتریکی خنثی است. وقتی دو جسم در تماس با هم قرار گیرند، الکترون‌ها از یک جسم به جسم دیگر انتقال می‌یابند. این تبادل الکترون‌ها متقارن نیست. وقتی دو جسم از هم دیگر جدا شوند، یکی دارای الکترون اضافی (بار منفی) و دیگری دارای الکترون کمتر (بار مثبت) است (شکل (۲)). در نتیجه هر دو جسم دارای بزرگی بار یکسان ولی علامت مخالف هم، باردار شده‌اند. الکترون‌ها در رساناها آزادانه حرکت می‌کنند و زود پخش می‌شوند ولی در نارساناها، الکترون‌ها بدون جنبش هستند و پدیده الکتریسیته ساکن پدیدار می‌شود[۶].



شکل ۲- تولید بار وقتی صفحه‌ها از هم جدا می‌شوند[۶].

همچنین یک جسم می‌تواند الکتریسیته ساکن را از جسم دیگر از طریق القاء دریافت کند (شکل (۳)). اگر یک جسم باردار (a) به جسم خنثی (b) نزدیک شود، جسم خنثی، باری با علامت مخالف بار القایی دریافت می‌کند[۶].



شکل ۳- نحوه باردار شدن جسم (b) از طریق القاء[۷].

۴-۲- تجمع بار

بارهای الکتروستاتیکی روی سطح رسانا که به زمین متصل است تجمع پیدا نمی‌کند ولی روی دو نوع سطح دیگر، ۱- نارساناها ۲- رساناهایی که به زمین متصل نیستند، تجمع پیدا می‌کند[۸]. وقتی روی جسمی بار تولید شود، نیروهای دفع متقابل بین بارهای مشابه، باعث پخش بار می‌شود. پس اگر بار روی جسم رسانایی باشد، و آن جسم به زمین متصل باشد، بار به راحتی به زمین منتقل می‌شود. اما وقتی جسم نارسانا باشد، بار به راحتی به زمین منتقل نمی‌شود. به این ترتیب، بارها جایی در جسم تجمع پیدا کرده و یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند[۴].

۴-۳- تخلیه بار

وقتی دو جسم در تماس با هم قرار گیرند و سپس از هم جدا شوند، هر دو جسم دارای بار الکتریکی از نوع تریبوالکتریک می‌شوند. بار الکتریکی ایجاد شده بین دو سطح به صورت ناهم‌نام است. دو سطح رسانا با بارهای مخالف و یک فضای نارسانا (هوا) میان این دو سطح رسانا وجود دارد. می‌توان مجموعه فوق را به صورت یک خازن با ظرفیت مشخص در نظر گرفت که توانایی ذخیره کردن بار الکتریکی را داراست (شکل (۳)). تجمع بارهای ناهم‌نام در خازن فوق موجب ایجاد اختلاف پتانسیل می‌شود. زمانی که اختلاف پتانسیل ایجاد شده به حدی برسد که قدرت میدان ایجاد شده ناشی از آن به مقدار شکست هوا (در حدود ۳ مگا ولت بر متر) برسد، تخلیه الکتریسیته ساکن اتفاق می‌افتد[۸]. با دانستن اختلاف پتانسیل بین الکترودها (U)، قدرت میدان (E) با استفاده از معادله (۱) به‌دست می‌آید:

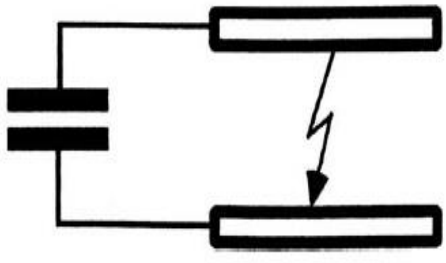
$$E = U/d \qquad (۱)$$

که در آن، d فاصله بین الکترودهاست. در تخلیه جرقه‌ای از یک خازن باردار (شکل (۴))، انرژی آزاد شده با معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$W = {CU^2}/{2} \qquad (۲)$$

که در آن، C ظرفیت است.

تخلیه جرقه‌ای ممکن است بین یک ظرف فلزی که در طول پر شدن باردار شده و متصل به زمین نیست، رخ دهد. ظرف شبیه یک خازن باردار رفتار می‌کند. همچنین بدن انسان از آنجایی که رسانای الکتریکی است، وقتی نسبت به زمین ایزوله باشد، رفتاری شبیه به یک خازن دارد و قادر به تخلیه جرقه‌ای است. اگر ظرفیت و پتانسیل یک سامانه ایزوله به زمین مانند، ظرف فلزی، فلنج یا بدن انسان، اندازه‌گیری شود، می‌توان انرژی موجود برای یک تخلیه جرقه‌ای را محاسبه کرد[۹].



شکل ۴- تخلیه جرقه ای یک خازن[۹].

۴-۴- پخش بار

از دیدگاه ماکروسکوپی و مزوسکوپی[1] سه سازوکار پخش بار تعریف شده است: ۱- هدایت ۲- القاء ۳- تخلیه کرونا. در پخش بار از طریق هدایت، بارهای تجمع یافته بر روی سطوحی که متصل به زمین نیستند، از طریق سیم اتصال به زمین، مستقیم به زمین انتقال می‌یابند. در القاء، بارهای تجمع یافته بر روی سطوحی که متصل به زمین نیستند، بارها با قطبیت مخالف بر روی سطوح رسانا متصل به زمین را القاء کرده و باعث خنثی سازی بارها می‌شود. در تخلیه کرونا، خنثی سازی جزئی بارها بر روی سطوح ایزوله توسط یون‌های هوا انجام می‌شود. میدان الکتریکی در نزدیکی ماده رسانا می‌تواند به حدی متمرکز شود که هوای مجاور خود را یونیزه نماید. این مسئله می‌تواند منجر به تخلیه جزئی انرژی الکتریکی شود، که به آن کرونا می‌گویند. در چند دهه اخیر، نتایجی در مورد تأخیر بار[2](مدت زمان تخلیه درصدی از بار) بر روی مواد رسانا و ایزوله، منتشر شده است[۱۰].

از دیدگاه ریاضی، یک مدل ساده تأخیر بار را می‌توان برای یک سطح دی الکتریک محاسبه کرد که برای ساده شدن محاسبات می‌توان یک سطح صاف، همان‌طور که در شکل (۵) می‌بینید، در نظر گرفت. همیشه بر روی سطح دی الکتریک یک لایه آلودگی مثل لایه آب، وجود دارد که به آن لایه سطحی می‌گویند[۱۰].

می‌توان مقدار کل بارها Q محبوس شده بر روی سطح S را به فرم انتگرالی معادله گاوس به فرم معادله (۳) تعریف کرد:

$$\int Eds = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_{rs}} \qquad (۳)$$

که در آن، E قدرت میدان الکتریکی بر حسب ولت بر متر (V/m)، ε_{rs}

1- Mesoscopic
2- Charge Decay

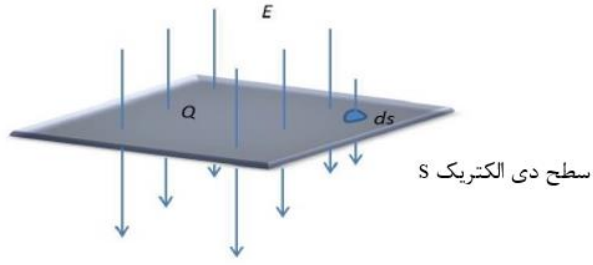
ضریب گذردهی نسبی سطح، ε_0 ضریب گذردهی خلأ $۸/۸۴۵\times۱۰^{-۱۲}$ فاراد بر متر($\frac{farads}{meter}$)، ds نشان دهنده المان کوچکی از سطح مقطع و S سطح مقطع بر حسب متر مکعب (m^2) است.

می توان تأخیر بار را به صورت معادله (۴) بیان کرد:

$$\frac{dQ}{dt} = -JS \qquad (۴)$$

$$J = E\sigma \qquad (۵)$$

که در آن، J چگالی بار بر حسب (A/m^2)، t زمان بر حسب ثانیه و σ هدایت الکتریکی بر حسب (S/m) است.



شکل ۵- مدل تأخیر بار بر روی یک سطح دی الکتریک، سطح مقطع ($S(m^2)$، در یک میدان الکتریکی با قدرت E(V/m)، مقدار کل بارها بر روی سطح Q(C) و ds نشان دهنده یک المان کوچک از سطح مقطع است[۱۰].

با استفاده از معادله‌های (۳-۱)، می‌توان معادله (۶) را به‌دست آورد:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{-Q\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon_{rs}} \qquad (۶)$$

بنابراین می‌توان تغییرات پتانسیل بار Q از $Q_{initial}$ با زمان t به صورت زیر به‌دست آورد.

$$Q = Q_{initial}exp(\frac{-\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon_{rs}}t) \qquad (۷)$$

با معرفی زمان آسایش بار[1] به صورت $\tau = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma}$، معادله (۷) به فرم معادله (۸) می‌شود.

$$Q = Q_{initial}exp(-t/\tau) \qquad (۸)$$

از آنجا که سطح غیر قابل تغییر است و ضریب گذردهی نسبی سطح معمولاً ثابت است، چنین رابطه‌ای را می‌توان برای پتانسیل الکتریکی سطح V نوشت.

$$V = V_{initial}exp(-t/\tau) \qquad (۹)$$

زمان آسایش بار τ در مواد دی الکتریک ارتباط نزدیکی به هدایت الکتریکی و ثابت دی الکتریک دارد. زمان آسایش بار، مدت زمان مورد نیاز برای خنثی سازی بار توسط فرآیندهای آسایش بار می‌باشد. این زمان در مایعات رسانا کوچک بوده ولی برای نیمه رساناها و نارساناها می‌تواند بزرگ باشد. اگر از چندین فرآیند آسایش بار استفاده شود، زمان آسایش متفاوتی می‌توان داشت که معادله به فرم معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$V = V_{initial}exp\left[a_1\, exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + a_2 exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \cdots\right] \qquad (۱۰)$$

بنابراین، تعداد مختلف زمان آسایش نشان دهنده راه‌های مختلف تخلیه بار است. معادله (۱۰) کمک می‌کند تا در مقیاس میکروسکوپی تأخیر بار اندازه‌گیری شود[۱۰]. زمان آسایش بار بعضی از سوخت‌های مایع در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۶- زمان آسایش بار بعضی از سوخت‌های مایع[۱].

مایعات	زمان آسایش بار (ثانیه)
بنزن، خالص شده	~۱۰۰
هپتان خالص	~۱۰۰
هگزان خالص	~۱۰۰
تولوئن	۲۱
زایلن	~۱۰۰
منومر استایرن	۲/۲

۵- راه‌های ایجاد و کنترل الکتریسیته ساکن در سوخت‌های مایع

۵- ۱- روش‌های ایجاد الکتریسیته ساکن در سوخت‌های مایع

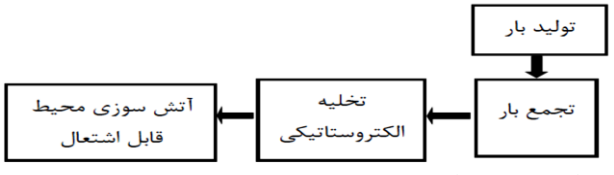
به‌طور کلی بار الکتروستاتیکی از چند روش به وجود می‌آید. هر گاه اصطکاکی بین دو جسم در حال حرکت وجود داشته باشد، بارهای الکتروستاتیکی به وجود می‌آیند. تولید بار در سامانه مایعات در مقیاس مولکولی و در سطح دو ماده نامشابه ایجاد می‌شود. پس الکتریسیته ساکن در هر سیال در حال حرکت اتفاق می‌افتد. روش‌های تولید بارهای الکتروستاتیکی در مایعات به صورت زیر می‌باشند[۱۱]:

- اصطحکاکی که توسط جریان مایع در لوله به وجود می‌آید؛
- سرعت زیاد مایعات؛
- جریان مایعات در لوله‌ها یا شلنگ‌هایی که به زمین متصل نیستند؛
- عبور مایعات از فیلترها یا دیگر ساختارهایی که حفره‌های ریز دارند؛
- اغتشاش در مایعات به وسیله پمپ، به ویژه پمپ گریز از مرکز؛
- بارگیری مایعات در مخازن.

نرخ تولید بار الکتریکی تحت تأثیر هدایت الکتریکی مایعات، مقدار اغتشاش یا آشفتگی در مایع، سطح تماس بین مایعات و دیگر سطوح، سرعت مایع و حضور ناخالصی می‌باشد[۱]. در شکل (۶) مثال‌هایی از الکتریسیته ساکن آورده شده است.

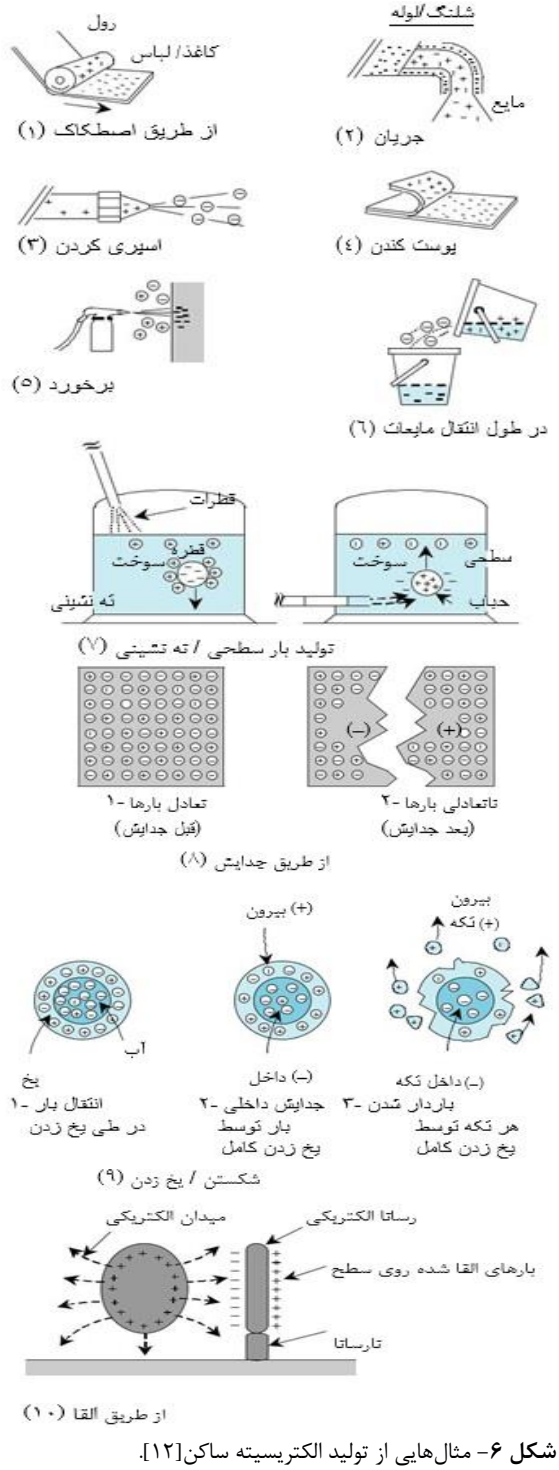
۵- ۲- راه‌های کنترل الکتریسیته ساکن در سوخت‌های مایع

اگر چه نمی‌توان تولید الکتریسیته ساکن را حذف کرد، اما نرخ تجمع آن را می‌توان کاهش داد. خطرات الکتریسیته ساکن از طریق وقایع زیر تعیین می‌شود:



که باید به تجمع بار توجه کرد.

1- Relaxation Time



شکل ۶- مثال‌هایی از تولید الکتریسیته ساکن[۱۲].

می‌توان از روش‌های زیر نرخ تجمع بار را کاهش داد[۱۳].

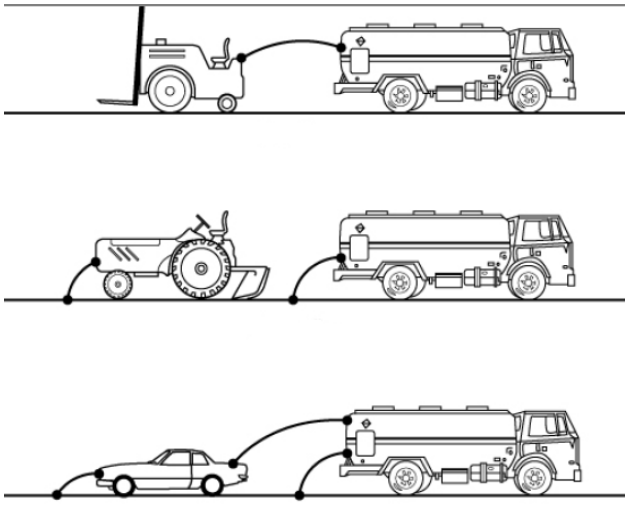
۵-۲-۱- سامانه اتصال به زمین و اتصال به همدیگر

همه تجهیزاتی که با فرآیند مایعات اشتعال پذیر در ارتباط هستند باید به زمین متصل باشند تا از تجمع الکتریسیته ساکن جلوگیری کند و در نتیجه احتمال آتش‌سوزی از طریق جرقه برای تخلیه الکتروستاتیک را کاهش دهد. تجهیزاتی که باید به زمین متصل شوند شامل، لوله‌ها، تانک‌ها، ظروف[1]، همزن‌ها، پمپ‌ها، شیرها، فلنج‌ها، کوپلینگ‌ها و دیگر اتصالات هستند. سوخت‌های با نقطه فلش کمتر از ۱۰۰ °F یا ۳۷/۸ °C نباید بین ظروف انتقال یابند مگر اینکه هر دو ظرف متصل به هم یا متصل به زمین باشند. سامانه اتصال به زمین و اتصال به همدیگر[2]، برای جلوگیری از تجمع الکتریسیته ساکن ضروری است[۱]. اتصال به زمین برای یکسان کردن اختلاف پتانسیل بین اجسام و زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. بین اجسام دارای پتانسیل یکسان تخلیه الکتروستاتیکی وجود ندارد[۴].

در طی سوختگیری هواپیما، جایی که سیمی به کامیون سوخت و هواپیما متصل است، این اتصال برای به حداقل رساندن اختلاف پتانسیل دو شیء رسانا استفاده می‌شود حتی وقتی که به زمین متصل نباشند[۴ و ۱۴]. بنابراین جرقه‌ای بین آن‌ها اتفاق نمی‌افتد چون هردو پتانسیل یکسانی دارند. ولی اگر واحد به زمین متصل نباشد (هم کامیون سوخت و هم هواپیما لاستیک‌های نارسانا دارند و نسبت به زمین ایزوله هستند) ممکن است همان پتانسیل زمین را نداشته باشد در نتیجه امکان جرقه بین واحدها و زمین وجود دارد[۴]. در شکل (۷) نمونه‌ای از اتصال به همدیگر و اتصال به زمین مشاهده می‌شود.

شناسایی تجهیزات و اجسام رسانا در طی یک فرآیند، برای یک سامانه اتصال به زمین بسیار مهم است. از این رو، آزمون‌ها و بازرسی‌های منظم به این دلیل است که تجمع بار الکتریسیته ساکن به حداقل برسد[۵].

لازم به ذکر است که همه اتصالات باید قبل از عملیات انتقال سوخت متصل شده باشند.



اتصال به همدیگر و اتصال به زمین

شکل ۷- نمونه‌ای از اتصال وسایل به یکدیگر و اتصال آن‌ها به زمین[۱۵].

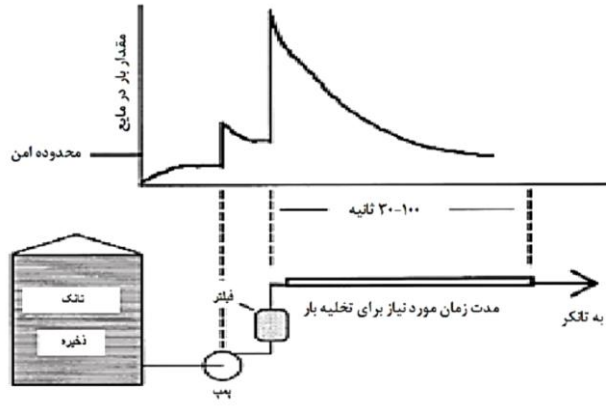
1- Containers
2- Grounding and Bonding

۵-۲-۲- استفاده از گازهای خنثی

ایمنی در هنگام انتقال و مخلوط مایعات قابل اشتعال غالباً وابسته به استفاده از گازهای خنثی[1]است. خنثی سازی یعنی وارد کردن یک گاز خنثی مثل نیتروژن، آرگون یا دی اکسید کربن به یک تانک یا مخزن سوخت، به منظور اینکه غلظت نسبی اکسید کننده را به زیر غلظت اکسید کننده محدود[2](LOC) کاهش دهد. غلظت اکسید کننده محدود، غلظتی از اکسید کننده است که کمتر از آن اشتعال و همچنین آتش‌سوزی یا انفجار رخ نمی‌دهد[۱].

۵-۲-۳- زمان دادن

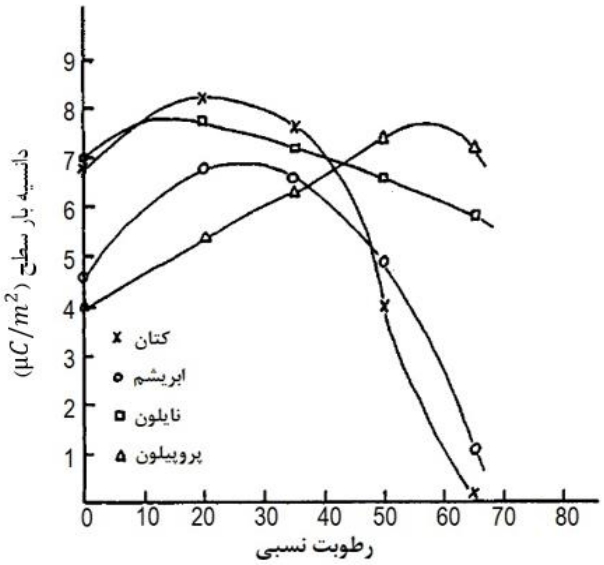
بعضی از سوخت‌های مایع قبل از اینکه وارد تانک‌های ذخیره شوند از فیلتر (صافی) عبور می‌کنند. میکرو فیلترها حفره‌هایی با قطر کوچک هستند (از ۱ μm تا ۱۵۰ μm). به خاطر سطح تماس بالا بین جامد-مایع، بار ساکن زیادی (تا ۲۰۰-۱۰۰ برابر) در مایعات نارسانا و نیمه رسانا تولید می‌شود (شکل (۸)). چگالی بار در سوخت‌هایی مثل کروسن، می‌تواند به $\mu C/m^3$ ۳۰۰۰- ۲۰۰۰ با وابستگی کم به نرخ جریان، برسد. به‌طور استثناء مایعات نارسانای ویسکوز، چگالی بار به بزرگی حدود $\mu C/m^3$ ۵۰۰۰ تولید می‌کنند. برای جلوگیری از ورود جریان بار بالا به داخل تانک، فیلتر را باید به اندازه کافی در جریان بالادست دور از تانک قرار داد تا اینکه بار به حالت اولیه (قبل از رسیدن به فیلتر) برسد. یک زمان استراحت به‌طور معمول ۱۰۰-۳۰ ثانیه‌ای باعث کاهش ۹۵٪ بار می‌شود[۱۴].



شکل ۸- شماتیک تغییرات چگالی بار در بارگیری تانکر[۱۴].

۵-۲-۴- افزایش رطوبت

یکی از راه‌های دیگر برای کاهش الکتریسیته ساکن، افزایش سطح رطوبت (بیش از ۶۵٪) است که اثر ضد استاتیکی دارد. در شرایط آب و هوایی مرطوب تولید می‌شود. می‌توان یک سطح عایق تمیز را در رطوبت صفر توسط مالش با ماده مناسب باردار کرد و برای مقدار مالش مناسب یک چگالی بار مشخصی وجود دارد. در رطوبت صفر، مکان‌های ذاتی برای اقامت بارها وجود دارد. وقتی که رطوبت افزایش پیدا کند، مولکول‌های آب بر روی سطح جذب می‌شوند و به‌عنوان مکان‌های اضافی عمل می‌کنند. بنابراین، با رطوبت کم چگالی بار دوباره افزایش می‌یابد. این فرآیند تا وقتی ادامه دارد که یک لایه آب بر روی سطح به وجود آید. در این شرایط، هدایت سطح با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد (شکل (۹)). این افزایش رطوبت، راه‌هایی برای انتقال بار ایجاد می‌کند و باعث کاهش تجمع بار بر روی سطح می‌شود[۴]. ولی رطوبت به تنهایی قادر به کنترل الکتریسیته ساکن نمی‌باشد. بعضی از مواد پلیمری مانند لوله‌های پلاستیکی، ظروف و سطح مایعات پتروشیمی، قادرند که وقتی حتی رطوبت ۱۰۰ درصد است، تجمع الکتریسیته ساکن داشته باشند[۱۵].



شکل ۹- چگالی بار سطح به‌عنوان تابعی از رطوبت[۴].

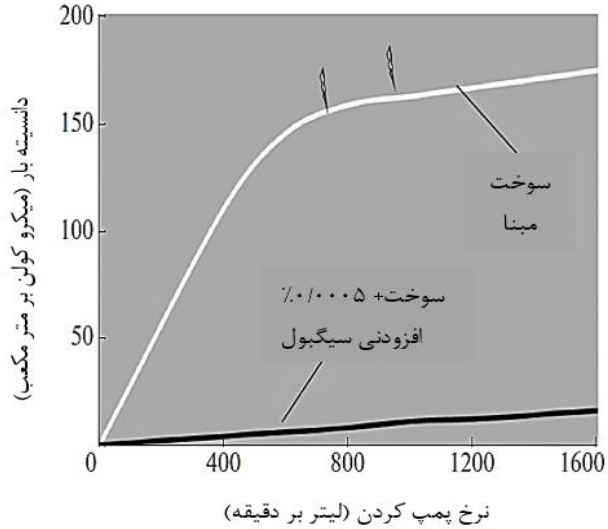
۵-۲-۵- افزایش رسانایی مایعات

در هنگام سوختگیری هواپیماهای مدرن، چند کار برای تمیز شدن سوخت انجام می‌شود. در نرخ بالای پمپ کردن، به ویژه استفاده از چند فیلتر، شرایطی را برای تولید و تجمع الکتریسیته ساکن در سوخت مهیا می‌کند. خطر الکتریسیته ساکن تولید شده از مایعات نارسانا مثل تولوئن، هگزان، هپتان، زایلن و دیگر حلال‌های غیر قطبی، می‌تواند با افزایش هدایت الکتریکی، به‌طور فزاینده‌ای کاهش یابد. هدایت الکتریکی یک مایع نارسانا (عایق) را می‌توان از طریق افزودنی ضد استاتیک یا افزودن یک مایع رسانا، افزایش داد. این افزودنی‌ها

1- Inert
2- Limiting Oxidant Concentration

به‌طور معمول روی نرخ تولید بار تأثیری ندارند بلکه با افزایش هدایت الکتریکی، بارها را قادر می‌سازد تا راحت‌تر در مایع پراکنده (پخش) شوند[۱]. مزیت استفاده از این افزودنی‌ها این است که افزودن ۵-۳ ppm از برخی از این مواد افزودنی قادر است رسانایی الکتریکی سوخت را تا چندین برابر بالا ببرد. همچنین چون با کاهش دما، هدایت الکتریکی مایعات کاهش می‌یابد، باید افزودنی تا حدی اضافه شود که در کمترین دمای مایع هم رسانایی الکتریکی را افزایش دهد. به نظر می‌رسد، دو سازوکار عمده برای دستیابی به این افزودنی‌ها وجود دارد. سازوکار اول، افزودنی‌های شامل چند نمک که در مایعات نارسانا[1] حل می‌شوند و حداقل یکی از این نمک‌ها به اندازه کافی قوی باشد تا یون‌های آزاد در محلول تولید کند. سازوکار دوم انتقال الکترون است. پلیمرهای مشخصی مانند، بعضی از پلیمرهای سولفونیک و آکریلات قادر هستند تا الکترون را از انتهای یک زنجیره به انتهای زنجیره دیگر انتقال دهد. ولی استفاده از این افزودنی‌ها کاملاً تجربی است. با این وجود عملکرد این افزودنی‌ها به‌طور تئوری قابل پیش‌بینی نیست و برای تعیین اینکه آیا یک افزودنی برای افزایش هدایت الکتریکی مؤثر است یا نه، احتیاج به آزمون‌های آزمایشگاهی است[۱].

استفاده از افزودنی‌های ضد الکتریسیته ساکن نه تنها باعث افزایش ایمنی سوخت می‌شود بلکه باعث مزیت‌های تجاری هم می‌شود. در حضور افزودنی، نرخ پمپ کردن چند برابر افزایش می‌یابد (شکل (۱۰)) که در بحث زمان سوختگیری هواپیما و بارگیری مخازن مهم است[۱۶].



شکل ۱۰- تأثیر افزودنی ضد الکتروستاتیک سیگبول بر تولید بارهای الکتریکی سوخت در زمان پمپ شدن[۱۶].

افزودنی‌های (Shell) ASA-3 و (Innospec) Stadis-450 در کشورهای پیشرفته و افزودنی سیگبول(sigbol) در کشورهای بلوک شرق برای سوخت استفاده می‌شود. افزودنی Stadis-450 توانایی ارتقای هدایت الکتریک سوخت‌ها را به ۴۵۰ پیکوزیمنس بر متر دارد (نام آن نیز از این عدد گرفته شده است). این بسته افزودنی در واقع مخلوطی از چند ماده مختلف می‌باشد که ترکیب این مواد در محصولات تجاری شرکت‌های مختلف، متفاوت است ولی ماده اصلی این محصولات دی نونیل نفتیل سولفونیک اسید می‌باشد.

این مواد باید در مایعات نارسانا حل شوند تا هدایت الکتریکی مایعات را افزایش دهد. در آخر، اگر مایعات افزودنی رسانا، اشتعال پذیر باشند، باعث افزایش اشتعال پذیری مایعات نارسانا و کاهش نقطه فلش می‌شوند[۱].

در مواد جامد، می‌توان با اضافه کردن مواد رسانا به این مواد، هدایت الکتریکی آن را افزایش داد. برای مثال، استفاده از کربن بلک در بعضی از پلاستیک‌ها برای افزایش هدایت الکتریکی آن استفاده می‌شود[۱۷]. لازم به ذکر است که هدایت الکتریکی مایعات با کاهش دما، کاهش می‌یابد. معادله تغییرات تقریبی هدایت الکتریکی سوخت‌هایی مثل گازوئیل و کروسن با دما به صورت زیر است:

$$log_{10}(\sigma_2/\sigma_1) \cong a(T_2 - T_1) \qquad (۱۱)$$

که در آن، σ هدایت الکتریکی در دمای T (℃) و a ثابتی است دارای واحد (۱/℃) که محدوده ۰/۰۰۱۸-۰/۰۰۹ برای سوخت‌های هوایی پیشنهاد شده است[۴ و ۱۴].

بنابراین اگر دستگاه اندازه‌گیری در دمای ۲۵ ℃ هدایت الکتریکی را ۱۰۰ pS/m نشان دهد، همین مایع در دمای ۱۰℃- هدایت الکتریکی در حدود ۳۰ pS/m خواهد داشت[۱۴].

۶- روش‌های اندازه‌گیری الکتریسیته ساکن

اندازه‌گیری الکتریسیته ساکن مهم است چون این امکان را به شما می‌دهد تا از وجود الکتریسیته ساکن، اندازه و مکانی که تولید می‌شوند، آگاه شوید[۱۸]. ابزارها و روش‌های مؤثر در مطالعه بارهای الکتروستاتیکی در ادامه آورده شده است.

۶-۱- میدان سنج

برای اندازه‌گیری بار الکتریکی روی اجسام، بدون نیاز به تماس با جسم مورد نظر، استفاده می‌شود. میدان سنج میدان الکتروستاتیکی اجسام را بر حسب ولت یا کیلو ولت اندازه‌گیری می‌کند. میدان سنج مدل‌های متفاوتی دارد که به یک مدل آن پرداخته می‌شود.

۶-۱-۱- دستگاه دیجیتالی میدان سنج الکتروستاتیکی مدل EMIT 50597

دستگاه دیجیتالی میدان سنج الکتروستاتیکی[2] ولتاژ سطح و قطبیت را روی اجسام تا ۱۹/۹۹ ± کیلو ولت در فاصله ۱ اینچ با دقت ۵٪ ±

1- Insulating Liquid

2- Static Field Meter

نشان می‌دهد. می‌توان از این دستگاه تقریباً تحت هر شرایطی شامل محیط یونی هم استفاده کرد. دقت آن به سه عامل زیر بستگی دارد:

۱. میدان سنج به وسیله یک سیم به زمین متصل باشد (یا میدان سنج توسط شیء متصل به زمین نگه داشته شده باشد).

۲. وسیله باید به درستی صفر را نشان دهد.

۳. فاصله از لبه‌دستگاه تا سطح مورد آزمایش باید به دقت مشخص باشد.

برای اندازه‌گیری باید لبه جلویی دستگاه را ۱ اینچ نسبت به سطح جسم نگه داشت. عدد نشان داده شده بر حسب کیلو ولت بر اینچ است. اگر صفحه نمایشگر عدد "۱" یا "۱-" را نشان داد یعنی میدان الکتروستاتیکی خارج از محدوده دستگاه است[۱۹]. در شکل (۱۱) نمایی از دستگاه نشان داده شده است.

شکل ۱۱- نمایی از میدان سنج مدل EMIT 50597[۱۹].

۱- دکمه Hold: فشار دهید تا عدد نشان داده شده ثابت شود. دوباره فشار دهید تا به حالت نرمال اندازه‌گیری برگردد.

۲- دکمه Range/Zero: فشار دهید برای انتخاب محدوده اندازه‌گیری. فشار دهید و نگه دارید تا صفر شود.

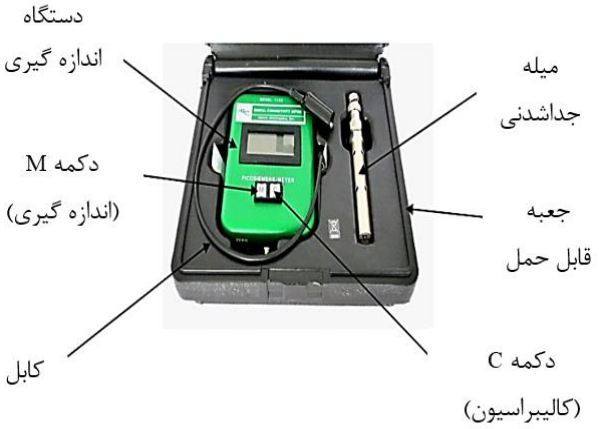
۳- دکمه Power: برای خاموش یا روشن کردن دستگاه فشار دهید.

۶-۲- سنجش هدایت الکتریکی

همانطور که قبلاً بیان شد، هر چه هدایت الکتریکی مایعات پایین باشد، الکتریسیته ساکن درون مایع تجمع پیدا می‌کند. پس برای اینکه بدانید که آیا الکتریسیته ساکن درون مایعی تجمع پیدا می‌کند یا نه باید هدایت الکتریکی آن را دانست. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی مایعات از دستگاه‌های مختلفی استفاده می‌شود که در زیر به مدل دیجیتالی ۱۱۵۲ اشاره می‌شود.

۶-۲-۱- هدایت الکتریکی سنج دیجیتالی

هدایت الکتریکی سنج دیجیتالی مدل ۱۱۵۲، هدایت الکتریکی سوخت‌ها را بر حسب پیکوزیمنس بر متر (pS/m) اندازه می‌گیرد. در شکل (۱۲) نمایی از این دستگاه را می‌توان مشاهده کرد. در این دستگاه، حسگر یا میله جدا شدنی[1] که در شکل (۱۳) نشان داده شده است به‌دستگاه متصل می‌شود و کابل به ظرف و دستگاه متصل می‌شود (شکل (۱۴)). ظرف را با سوخت مورد نظر پر کرده و به مدت ۲ دقیقه اجازه داده می‌شود تا الکتریسیته ساکن ایجاد شده در هنگام پر کردن ظرف، پخش شود. سپس حسگر هدایت سنج را تا حفره دوم در نمونه وارد نموده و دکمه M را به مدت ۳ ثانیه فشار داده با این کار، یک جریان الکتریکی مستقیم کوچک درون سوخت ایجاد می‌شود و هدایت الکتریکی را بر حسب pS/m نشان می‌دهد[۲۰].



شکل ۱۲- دستگاه هدایت الکتریکی سنج مدل دیجیتالی ۱۱۵۲[۲۰].

شکل ۱۳- میله جدا شدنی یا حسگر و عدد کالیبراسیون[۲۰].

1- Probe

شکل ۱۴- نحوه آزمایش یک سوخت[۲۰].

۷- نتیجه‌گیری

سوخت‌های مایع که دارای هدایت الکتریکی پایینی هستند مستعد تجمع الکتریسیته ساکن می‌باشند. همان‌طور که بحث شد انتقال، انبارش، پاشش و یا همزدن موجب تجمع بار ساکن در سیالات با هدایت الکتریسیته پایین خواهد شد و در صورت افزایش بار ساکن بیش از انرژی یونیزاسیون هوا جرقه و متعاقباً آتش‌سوزی و انفجار رخ خواهد داد. از این رو کاهش تولید الکتریسیته ساکن از طریق آنتی استاتیک‌ها با هدف افزایش رسانایی سوخت‌ها مفید خواهد بود. و حذف بارهای ساکن ایجاد شده طی فرآیندهای مذکور از طریق اتصال به زمین راهی مطمئن جهت حذف بارهای تولید شده می‌باشد. همچنین می‌توان با کاهش سرعت انتقال سوخت‌ها و نصب صافی‌ها در دورترین فاصله ممکن از مخازن مورد استفاده تولید الکتریسیته ساکن را کاهش داد.

مراجع

[1] Mulligan, J. C. “Handling Flammable Liquid”; Chilworth Technology, INC, 2003.

[۲] شکرریز، مرضیه؛ تقی پور، سهراب "ساخت و فرمولاسیون ماده افزودنی ضد الکتریسیته ساکن برای گازوییل کم گوگرد"؛ نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، سال نهم، شماره ۴، صفحه ۶۳، ۱۳۹۴.

[۳] جدائی، المیرا؛ میر محسنی، عبدالرضا "تهیه کامپوزیتی از پلیمرهای مهندسی با خاصیت ضد الکتریسیته ساکن"؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۸.

[4] Pratt, T. H. “Electrostatic Ignition of Fires and Explosions”; John Wiley, New York, 1997.

[5] James, R. R. “Generation and Control of Static Electricity in Coating Operation”; Am. Coat. Ass., USA, 2010.

[6] Martin, P.T. “Ignition Hazards Caused by Electrostatic Charges in Industrial Process”; Swiss Institute of Safety and Security Peter Thurnherr, Thuba Ltd, The Explosion Proofing Co., 2015.

[7] Othmer, K. “Encyclopedia of Chemical Technology”; John Wiely, New York, 1992.

[8] Kaiser, L. K. “Electrostatic Discharge”; Taylor & Francis, 2006.

[9] Wilson, N. “Electrostatic Hazards”; Oxford, 1997.

[10] Yin, J.; Nysten, B. “Charge Conduction and Dissipation in Fibers and Felts:Study by Scanning Probe Microscopy”; Ph.D. Thesis, Université Catholique de Louvain, UCL, 2016.

[11] Galembeck, F.; Burgo, T. “Chemical Electrostatics”; Springer, 2017.

[12] Ota, K. “Evaluation and Prevention of Electrostatic Hazards in Chemical Plants”; Sumitomo Chemical Co, Process & Production Technology Center, 2004.

[13] Gibson, N. “Static Electricity – an Industrial Hazard under Control”; J. Electrostatics, 1997,40-41, 21-30.

[14] Britton, L. G. “Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations”; Am. In. Chem. Eng. 1999.

[15] Benedetti, R. P. “Technical Committee on Static Electricity”; NFPA 77, 2012.

[16] Danilov, A. M. “Progress in Research on Fuel Additives’’; Pet. Chem. 2015, 179-190.

[17] Pionteck, J.; Wypych, G. “Handbook of Antistatic”; Chem. Tech. Toronto, 2006.

[18] Kikunaga, K.; Hoshi, T.; Fujii, Y. “Measuring Technique for Static Electricity Using Focused Sound’’; J. Electrostatics, 2013, 71, 554-557.

[19] Emit, Technical Bulletin TB-6567 “Digital Static Field Meter Operation and Maintenance”; USA, 2009.

[20] Emcee Electronics, INC “Digital Conductivity Meter Model 1152 Operation Manual”; Venice, 2001.