



반도체 산업 공정가스의 혼화성에 따른 반응성 고찰

†이근원

안전보건공단 산업안전보건연구원
(2016년 8월 3일 접수, 2016년 8월 25일 수정, 2016년 8월 26일 채택)

Reactivity Considerations with Miscibility of Process Gases in Semiconductor industry

†Keum Won Lee

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Deajeon 34122, Korea
(Received August 3, 2016; Revised August 25, 2016; Accepted August 26, 2016)

요약

반도체 산업에서 많은 종류의 화학물질 사용으로 인한 독성물질 누출과 화학물질간의 혼화에 따른 화재·폭발 등에 의한 화학사고의 위험성이 증가하고 있다. 화학물질의 혼화에 따른 반응성을 평가하는데 실험적 방법이 가장 신뢰성 있지만, 모든 화학물질을 실험을 통하여 평가하는 것은 시간적, 비용적인 제한이 있다. 본 연구에서는 반도체 산업에서 주로 사용되는 공정가스의 위험성 추정하기 위해 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)과 EPA에서 개발한 CRW(Chemical Reactivity Worksheet) 3.0 프로그램을 사용하여 공정가스의 반응성을 고찰하였다. 이들 연구 결과는 반도체산업의 공정가스의 혼화성에 따른 반응성 정보와 저장캐비닛의 가스 실린더 보관에 관한 KOSHA 기술지침 작성에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

Abstract - In the semiconductor industry, the risk of chemical accidents due to miscibility between the many types of chemicals and leakage of toxic chemicals has increased. In order to evaluate the reactivity with miscibility of chemicals, experimental method is the most reliable, but there is a time and cost limitations to be evaluated through experiment all the chemicals. In the study, the reactivity of process gases in the semiconductor industry was considered by the CRW (Chemical Reactivity Worksheets) 3.0 program developed by US NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) and EPA. The reactivity informations with the miscibility of process gases for semiconductor industry provided, and also a KOSHA guide for the storage/separation of gas cylinders in dispensing cabinets in the semiconductor industry was proposed.

Key words : CRW 3.0, reactivity, semiconductor industry, gas cylinders, cabinets

1. 서론

반도체 산업에서 화학물질 누출로 인한 화학사고의 증가와 많은 종류의 화학물질 사용으로 인한 화학물질간의 혼화성에 따른 화재, 폭발 및 독성물질 등에 의한 위험성이 증가하고 있다. 화학물질의 혼합에 따른 반응 위험성을 평가하는데 실험적 방법이 가장 신

뢰성 있지만, 모든 화학물질을 실험을 통하여 평가하는 것은 시간적, 비용적인 제한이 있다[1]. 따라서, 국제표준화기구(ISO) 등에서 채택된 원칙에 따른 반응 위험성을 추정하는 Chemical Reactivity Worksheet (CRW) 프로그램을 활용하여 평가한다[2]. CRW 프로그램은 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 1988년에 소개된 이래 반응성 화학물질의 위험성을 예측하는 프로그램이다. 이 프로그램은 화학물질이 서로 혼합되어 일어날 수 있는 반응위험성을 예측하는 프로그램으로 비상대응이나

†Corresponding author:leekw@kosha.or.kr
Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

계획 설계자에게 유용하며, 6,000종 이상의 화학물질에 대한 반응성 정보를 가진 데이터베이스(DB)를 제공하고 있다[3]. 이 소프트웨어 툴(tool)은 화학공정안전, 저장 혼합성의 예측과 유해화학물질누출 사고의 대응에 활용된다[4]. 2012년에는 미국에서 개최된 제 8회 세계 공정안전회의(Global congress on process safety)에서 CCPS 화학반응성평가 툴로서 소개한바 있다[5]. 그러나, 국내에서는 CRW 프로그램을 이용하여 화학물질의 반응위험성 평가에 관한 선행 연구는 거의 없다.

화학물질 혼합에 따른 반응위험성에 관한 연구로는 C. Wei (2004년)은 1980년부터 2001년까지 미국 CSB에서 발행한 화학사고 보고서를 분석한 결과 167건의 화학반응성 사고 중 호환성이 없는 물질(incompatible materials)에 의한 사고가 54%를 차지한다고 하였다. 이들 사고를 MSDS, CRW 및 CHETAH 프로그램을 이용하여 위험성을 분석하여 반응위험성의 스크린하는 도구(tool)로서 사용 가능함을 증명하였다[6]. D.A. Crowl 등 (2004년)은 반응성 화학물질에 대한 PSM과 RMP 요구사항을 작동시키기 위해 다양한 위험기준에 대한 적용여부를 검토하였다[7]. Yen-Shan Liu 등 (2006년)은 NOAA의 Chemical Reactivity Worksheets, MSDS 및 Bretherick's Handbook의 반응화학 위험성의 선별(Screening)시험의 조합은 세부적인 위험평가의 비용을 줄이는 반면에 공정안전을 향상시킬 수 있음을 제시하였다[8]. Dave Gorman 등 (2014)은 화학물질의 호환성(Compatibility) 결정을 위한 향상된 NOAA의 Chemical Reactivity Worksheets 3.0를 소개하였다[9].

본 연구에서는 화학물질의 혼합성(Miscibility)에 따른 반응위험성 추정하기 위해 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)과 EPA에서 개발한 CRW(Cheical Reactivity Worksheet) 3.0 프로그램을 사용하여 반도체 산업에서 사용되는 공정가스의 반응성을 고찰하였다. 또한, 반도체 공정의 공정가스 혼합에 따른 반응성 정보와 안전보건 기술지침(안)을 제시하여 사고예방에 기여하고자 한다.

II. 연구대상 화학물질 및 분석방법

1. 연구대상 화학물질 선정

반도체 산업에서 사용되고 있는 화학물질을 대상으로 반응위험성을 추정하고자 연구대상 물질로 반도체 장비재료협회 (SEMI, Semiconductor Equipment and Material Institute)의 규격 S4-0340에서 제시한 반도체 공정용 가스 52종을 검토하였다[10]. 그러나, 국내 반도체 제조 사업장의 현장 방문조사를 통해 반도체 산업에서 많이 사용되고 있는 공정용 가스 39종을 연구대상 물질로 선정하였다. 이들 공정용 가스는 우리나라 반도체 제조공정에 사용되고 있는 화학물질로 확인되었으며, 연구대상 화학물질 목록을 Table 1에 나타내었다.

2. 반응성 분석 방법

화학물질의 혼합에 따른 반응성을 결정하기 위해 미국 NOAA와 EPA에서 개발한 CRW (Chemical Reactivity Worksheet) 3.0 프로그램을 사용하였다. CRW는 개별적인 화학물질의 반응위험성을 추정할 수 있고, 화학물질이 혼합되어 일어날 수 있는 위험성을 예측하는데 사용되는 소프트웨어이다. 이 프로그램의 염소(Cl₂)에 대한 화학물질 데이터시트의 일부분의 예를 Fig. 1에 나타내었다. 이 데이터시트는 화학물질의 CAS 번호와 UN번호, 화학식, NFPA 등급, DOT(Department of transportation) 위험표지, 반응성그룹, 반응성경고, 해당물질의 설명과 반응성 개요 등이 표시된다.

분석방법은 반도체 산업용 연구대상 화학물질의 이름을 DB에 입력하여 Search를 하여 "Add to Mixture" 메뉴를 눌러 "Chemical/Reactive Group Name"에 입력한다. 입력한 데이터 (Input data)의 예를 하나만 Fig. 2에 나타내었다. CRW 프로그램의 Mixture manager 메뉴에서 연구대상 화학물질을 입력하면 프로그램이 가지고 있는 화학물질 데이터베이스에서 물질의 반응성 그룹 등을 검색하여 Mixture 메뉴에 각각의 화학물질이 저장되고 Compatibility chart를 실행시키면 Fig. 3과 같은 호환성 차트(Compatibility chart)가 완성된다. 이 차트에서 "N"으로 나타나면 혼합에 따른 반응위험성이 예측되는 것으로 두 물질이 혼합되었을 경우에 잠재된 위험성과 발생가능 가스를 추정하였다.

Table 1. Lists of process gases in semiconductor industry

CAS No.	Materials	NFPA Class		
		Health	Flammability	Reactivity
7783-82-6	Tungsten Hexafluoride	3	0	2

반도체 산업 공정가스의 혼화성에 따른 반응성 고찰

(Continued Table 1)

CAS No.	Materials	NFPA Class		
		Health	Flammability	Reactivity
122-52-1	Trimethyl Phosphine	2	2	2
10025-78-2	Trichlorosilane	3	4	2
75-69-4	Trichlorofluoromethane, Refrigerant R23	2	0	0
75-73-0	Tetrafluoromethane, Refrigerant R14	1	0	0
2551-62-4	Sulfur Hexafluoride	0	0	0
7783-61-1	Silcon Tetrafluoride	3	0	2
10026-04-7	Silicon Tetrachloride	3	0	2
7803-62-5	Silane	1	4	3
7803-51-2	Phosphine	4	4	2
76-19-7	Octafluoropropane, Perfluoropropane	1	0	0
7782-44-7	Oxygen	3	0	0
10024-97-2	Nitrous oxide	2	0	0
7783-54-2	Nitrogen trifluoride	3	0	0
7727-37-9	Nitrogen	3	0	0
10102-43-9	Nitric oxide	3	0	3
593-53-3	Methyl fluoride	1	4	0
74-87-3	Methyl chloride	1	4	0
7783-06-04	Hydrogen sulfide	4	4	0
7664-39-3	Hydrogen fluoride	4	0	1
7647-01-0	Hydrogen chloride	3	0	1
1333-74-0	Hydrogen	0	4	0
76-16-4	Hexafluoroethane	1	0	0
7440-59-7	Helium	1	0	0
7782-65-2	Germane	4	4	3
4109-96-0	Dichlorosilane	4	4	2

(Continued Table 1)

CAS No.	Materials	NFPA Class		
		Health	Flammability	Reactivity
75-71-8	Dichlorodifluoromethane, Refrigerant R12	1	0	1
19287-45-7	Diborane	4	4	3
76-15-3	Chloropentafluoroethane	0	0	0
75-72-9	Chlorotrifluoromethane	1	0	0
7782-50-5	Chlorine	4	0	0
56-23-5	Carbon tetrachloride	3	0	0
124-38-9	Carbon dioxide	1	0	0
75-63-8	Bromotrifluoromethane	0	0	0
7637-07-02	Boron trifluoride	3	0	1
10294-34-5	Boron trichloride	4	0	2
7784-42-1	Arsine, Arsenic trihydride	4	4	2
7740-37-1	Argon	0	0	0
7664-41-7	Ammonia	3	1	0

III. 결과 및 고찰

3.1. 공정가스의 반응성 분석

반도체 산업에서 사용되고 있는 공정가스의 혼화에 따른 반응성을 평가하기 위해 CRW 3.0 프로그램을 활용하여 호환성 차트를 작성하였다. Fig. 3은 1.3-부타디엔, 염소, 가솔린 및 물에 대해 반응에 따른 호환성 차트를 타내었다. 가솔린과 염소가 반응할 경우 "N"으로 표시되어 반응 위험성 예측된다. 즉, Fig.3의 하단에서 보는 바와 같이 반응생성물의 위험성과 발생 가능한 잠재가스 등을 예측할 수 있다.

국내 반도체 산업에서 사용되고 있는 화학물질인 공정가스를 개별적으로 Fig. 2와 같이 입력한 데이터에 대해 CRW 3.0 프로그램을 실행시켜 얻은 반응 위험성에 대한 호환성 차트의 예를 하나만 Fig. 4에 나타내었다. Fig.4의 호환성 차트에서 "Y"의 경우는 혼합하여도 반응 위험성이 없는 경우를 말하며 두 물질을 혼합하여 보관하여도 특별히 예측되는 위험성이 없다. "C"의 경우에는 특정한 조건하에서 반응 위험성이 예측되는 것으로 정확한 위험성을 예측할 수는 없지만 특별

히 주의할 필요가 있다. "SR"의 경우에는 중합과 같은 잠재적으로 자기 반응성이 있는 물질이다. "N"의 경우에는 두 물질을 혼합하거나 혼화할 경우 반응 위험성이 예측되는 물질로서 공정상 필요한 경우는 특별히 주의 요하거나 안전대책을 수립 후 사용하여야 한다.

본 연구에서는 반도체 공정용 가스의 혼화성에 따른 반응 위험성이 예측되는 경우(N)에만 반응 위험성 정보의 대표적인 예를 하나만 Table 2에 나타내었다. 이들 위험정보는 반도체 공정가스를 취급하는 근로자나 연구원들이 혼화성에 따른 반응 위험성을 사전에 인지하고 활용하면 화학물질 누출에 의한 사고 예방 대책 수립에 활용 될 수 있을 것이다.

3.2. 산업안전보건 기술지침 제정(안)

반도체 산업에서 산업안전보건 기술지침으로 반도체 관련 기술연구를 수행하거나 작업에 사용되는 저장캐비닛에 가스를 함께 보관하거나 분리해서 두는 가스 실린더의 보관에 필요한 사항을 제시하는 데 그 목적이 있다. 이 지침은 기체 또는 액체 화학물질이 들어있는 내용적이 1,000 L까지의 모든 형태의 실린더에

Mixture Manager | Mixture Report | Compatibility Chart | **Reactive Groups** | Custom Chemical List | Absorbent Incompatibilities

Chemical Datasheet for: CHLORINE

Chemical Info | Physical Properties | Synonyms

CAS Number: 7782-50-5 | UN/NA Number: 1017 | USCG CHRIS Code: CLX | Chemical Formula: Cl₂

DOT Hazard Label: Poison Gas, Oxidizer, Corrosive | Reactive Group(s): Oxidizing Agents; Halogenating Agents | Reactivity Alert(s): Strong Oxidizing Agent; Water-Reactive

General Description: A greenish yellow gas with a pungent suffocating odor. Toxic by inhalation. Slightly soluble in water. Liquefies at -35°C and room pressure. Readily liquefied by pressure applied at room temperature. Density (as a liquid) 13.0 lb / gal. Contact with unconfined liquid can cause frostbite by evaporative cooling. Does not

Reactivity Profile: CHLORINE reacts explosively with or supports the burning of numerous common materials. Ignites steel at 100° C in the presence of soot, rust, carbon, or other catalysts. Ignites dry steel wool at 50° C. Reacts as either a liquid or gas with alcohols (explosion), molten aluminum (explosion), silane (explosion)

Fig. 1. An example of display screen of chlorine.

File Edit

Mixture Manager | Mixture Report | Compatibility Chart | **Reactive Groups** | Custom Chemical List | Absorbent Incompatibilities | Help

Click New Mixture and name the mixture. Type in your search criteria, then click Search. Click the chemical's name, then click Add to Mixture. Repeat for other chemicals, then click View Chart for a compatibility summary. Click Help to learn more.

1 chemical found exactly matching: Chemical Name/Synonym -> phosphine

Chemical Search Search Mode: Exact Word starts with Anywhere

Chemical Name: _____ CAS Number: _____ UN Number: _____ Formula: _____ DOT Label: _____

Search results list chemicals meeting ALL criteria entered; not "either/or".

X	Chemical Name (double-click on chemical name to add to selected mixture)	CAS #	UN #	DOT Label	Formula	1
X	PHOSPHINE	7803-51-2	2199	Poison Gas,	H3P	

Chemical Name: PHOSPHINE CAS #: 7803-51-2 UN #: 2199 DOT Label: Poison Gas, Flammable Gas Formula: H3P

General Description: A colorless gas with a disagreeable odor of fish or garlic. Boiling point -126°F; freezing point -209°F. Very toxic by inhalation at extremely low concentrations. Prolonged heating may

Reactive Group(s): Amines, Phosphines, and Pyridines; Reducing Agents

Reactivity Alert(s): Strong Reducing Agent; Pyrophoric

Synonyms (double-click to add to mixture): CELPHOS, DELICIA, DETIA, GAS-EX-B, HYDROGEN PHOSPHIDE

NFPA 704 hazard diamond: Health 4, Flammability 0, Instability 2, Special

Mixture: SEMI Materials 4 mixtures available

Chemical / Reactive Group Name	CAS Number	RG Number(s)	39 chemicals in mixture
AMMONIA, ANHYDROUS	7664-41-7	61	
ARGON	7440-37-1	98	
ARSINE	7784-42-1	45	
BORON TRICHLORIDE	10294-34-5	59	
BORON TRIFLUORIDE	7637-07-2	47, 59	
BROMOTRIFLUOROMETHANE	75-63-8	47	
CARBON DIOXIDE	124-38-9	98	
CARBON TETRACHLORIDE	56-23-5	17	
CHLORINE	7782-50-5	44, 59	
CHLOROPENTAFLUOROETHANE	76-15-3	47	
CHLOROTRIFLUOROMETHANE	75-72-9	47	
DIBORANE	19287-45-7	35	

New Mixture | Rename Mixture | Delete Mixture | Add Reactive Group | Add Water | View Chart

Fig. 2. Example display of chemical materials.

Table 2. An example of reactivity summary

Chemical name	Selected incompatible chemicals	Hazard Summary	Potential gases
Ammonia, Anhydrous	Chlorine	Reaction products may be corrosive. Reaction products may be explosive or sensitive to shock or friction. Reaction liberates gaseous products and may cause pressurization. Exothermic reaction at ambient temperatures (releases heat), Reaction may be particularly intense, violent, or explosive. Reaction products may be toxic.	Ammonia Hydrogen Halide Oxygen Sulfur Dioxide
	Diborane	Reaction products may be corrosive and flammable Reaction liberates gaseous products and may cause pressurization Exothermic reaction at ambient temperatures (releases heat) Reaction may be particularly intense, violent, or explosive	Hydrocarbons Hydrogen

The screenshot displays a software interface for chemical compatibility analysis. At the top, there are tabs for 'Mixture Manager', 'Mixture Report', 'Compatibility Chart', 'Reactive Groups', and 'Custom Chem'. Below these are buttons for 'Print Chart' and 'Export to Excel'. The main area is a 'Chemical Pairs' table with columns for 'NFPA' (Health, Flammability, Instability, Special) and compatibility codes for various chemical pairs. A 'Chart Legend' pop-up window is visible, defining the codes: Y (Compatible), N (Incompatible), C (Caution), and SR (Self-Reactive). Below the table, there are sections for 'Hazard Summary', 'Potential Gases', 'Documentation', and 'User Comments'. The 'Hazard Summary' section shows the selected chemical combination of GASOLINE and CHLORINE and lists associated hazards such as 'Reaction products may be corrosive' and 'Reaction liberates gaseous products and may cause pressurization'.

Health	Flammability	Instability	Special	1,3-BUTADIENE	CHLORINE	GASOLINE	WATER
2	4	2		SR			
4	0	0	8	N			
1	3	0		C	N		
				C	N	Y	

Chart Legend

- Y : Compatible**
No hazardous reactivity issues expected.
- N : Incompatible**
Hazardous reactivity issues are expected.
- C : Caution**
May be hazardous under certain conditions.
- SR : Self-Reactive**
Potentially Self-Reactive (e.g., polymerizable)

Hazard Summary

Selected Chemical Combination: GASOLINE, CHLORINE

Reaction products may be corrosive
Reaction products may be flammable
Reaction liberates gaseous products and may cause pressurization
Exothermic reaction at ambient temperatures (releases heat)

Fig. 3. An example of compatibility chart for chemical materials.

적용된다. 또한, 독성물질이나 인화성물질을 취급하는 반도체 공정 등에서 실린더 가스를 사용하거나, 나누어 주는데 적용되며, 실린더에서 공급되는 퍼지가 스에도 적용된다. 다만, 일종의 공정장비에 통합되어 있는 화학실린더와 용접과 같은 부수적인 목적을 위

한 제조시설에 사용되는 화학물질에 대해서는 적용하지 않는다. 기술지침의 구성은 용어의 정의, 화학물질의 분류, 실린더의 분리 및 보관에 관한 일반 사항으로 구성하였고, 주요내용은 다음과 같다.

Table 3. Classifications and symbols according to characteristics of chemical substances

Classification	Symbol
Flammable	F
Pyrophoric	P
Ccorrosive	C
Toxic	T
Oxidizer	O
Inert	I
Irritant	IRR
Water reactive	WR
Unstable or reactive	UR
Other health hazard	OHH

3.2.3. 분리 (Separation)

- (1) 불활성 가스를 제외하고, 각 화학물질을 별도의 분리된 캐비닛에 보관하여야 한다.
- (2) 화학물질이 정확히 같은 분류기호를 가지지 않는다면 서로 다른 가스 캐비닛에 보관하여야 한다.
- (3) 불활성(I) 가스는 다른 화학물질과 분리·보관하지 않아도 된다.
- (4) 자극성(IRR) 화학물질은 자극성이 없는 화학물질과 함께 하나의 가스 캐비닛에 보관할 수 있다.
- (5) 가스 저장실내에 분리 조건은 Table 4에 따라 각 실린더를 분리하여야 한다.
- (6) 서로 혼합할 수 없는 물질은 Table 5의 화학물질의 호환성 차트에 따라 혼합할 수 없는 물질은 저장 캐비닛에 실린더를 분리·보관하여야 한다.

IV. 결론

본 연구는 CRW(Cheical Reactivity Worksheet) 3.0 프로그램을 사용하여 반도체산업의 화학물질 누출에 따른 공정용 가스의 혼화성에 따른 반응위험성을 추정하였다. 국내 반도체 산업에서 많이 사용되고 있는 암모니아 등 공정용 가스 39종을 선정하여 반응위험성을 추정하여 Table 5와 같은 혼화성 차트를 제시하였다. Table 5에서 "N"으로 표시된 것은 두 물질이 혼화할 수 없는 경우로서 반응 위험성이 있는 물질

Table 4. Classifications with gases

Gas	Cas no.	Classification
Perfluoropropane	76-19-7	I
Dimethyl zinc	544-97-8	C--P-UR-WR
Diborane	19287-45-7	T-IRR-P-WR
Diethyl zinc	557-20-0	C-P-UR-WR
Dichlorodifluoromethane	75-71-8	I
Dichlorosilane	4109-96-0	C-P-T-WR
Arsenic pentafluoride	7784-36-3	C-T-OHH-W R
Carbon tetrachloride	56-23-5	OHH
Boron trifluoride	7637-07-02	C-T-WR
Boron trichloride	10294-34-5	C-WR
Argon	7740-37-1	I
Arsenic trihydride	7784-42-1	F-T-OHH
Ammonia	7664-41-7	C-F
Chlorine	7782-50-5	C-O-T
Carbon dioxide	124-38-9	I
Trichlorofluoromethane	75-69-4	I
Oxygen	7782-44-7	O
Silane	7803-62-5	P
Silicon tetrachloride	10026-04-7	C-WR
Silcon tetrafluoride	7783-61-1	C-T-WR
Phosphorous pentafluoride	7647-19-0	C-T-WR
Trimethyl indium	3385-78-2	P
Triethyl indium	923-34-2	P
Trimethyl gallium	1445-79-0	P
Trimethyl arsine	593-88-4	F-T
Trimethyl antimony	594-10-5	F-T
Trimethyl aluminum	75-24-1	P
Trimethyl phosphine	122-52-1	F-T
Triethyl aluminum	97-93-8	P
Trichlorosilane	10025-78-2	C-F-UR
Phosphine	7803-51-2	T-P
Tungsten hexafluoride	7783-82-6	C-TWR
Sulfur hexafluoride	2551-62-4	I

이다. 또한, 반도체 산업의 공정용 가스에 대한 화학물질 혼화에 따른 반응위험성 분류 정보와 저장 캐비닛의 가스 실린더 보관에 관한 KOSHA GUIDE 작성에 필요한 기초자료를 제시하였다. 본 연구에서는 반도체 공정용 가스의 혼화에 따른 반응 위험성을 제시하였지만, 향후 반도체 공정별 및 연구용 화학물질에 대한 반응위험성을 추정하여 화학물질 취급·사용 근로자나 연구자에게 위험성 정보를 제시하는 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] Keun Won Lee, "Development of Reactivity Matrix to Determine Mixture Risk of Chemical Materials(I)", 2014-OSHRI-598, Occupational Safety and Health Research Institute, KOASH, (2014)
- [2] Keun Won Lee, "Development of Reactivity Matrix to Determine Mixture Risk of Chemical Materials(II)", 2015-OSHRI-1094, Occupational Safety and Health Research Institute, KOASH, (2015)
- [3] Dave Gorman et al., "Enhanced NOAA Chemical Reactivity Worksheet for Determining Chemical Compatibility", 9th Global Congress on Process Safety, San Antonio, Texas, (2013)
- [4] L.E., Johnson and J.A. Farr, "CRW2-A Representative Compound Approach to Functionality-Based Prediction of Reactive Chemical Hazards", *Process Safety Progress*, **27**(3), 212-218, (2008)
- [5] Edward Mark Davis et al., "The CCPS Chemical Reactivity Tools", 8th Global Congress on Process Safety, Houston, TX, 2-28, (2012)
- [6] Chunyang Wei et al., "Application of screening tools in the prevention of reactive chemical incidents", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **17**, 261-269, (2004)
- [7] D.A. Crowl and T.I. Elwell, "Identifying Criteria to Classify Chemical Mixtures as 'Highly Hazardous' due to Chemical Reactivity", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **17**, 279-289, (2004)
- [8] Yen-Shan Liu et al., "Screening Reactive Chemical Hazards", *CEP*, 41-47, May (2006)
- [9] Dave Gorman et al., "Enhanced NOAA Chemical Reactivity Worksheet for Determining Chemical Compatibility", *Process Safety Progress*, **33**(1), 4-18, (2014)
- [10] SEMI S-0304, "Safety Guideline for the Separation of Chemical Cylinders Contained in Dispensing Cabinets", SEMI, (2004)
- [11] SEMI S4-92, "Safety Guideline for the Segregation/Separation of Gas Cylinders Contained in Cabinets", SEMI, (1992)