

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเรื่อง ระดับฟีนอลในปัสสาวะของพนักงานในสถานประกอบการอุตสาหกรรม
ได้กำหนดกรอบในการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

1. รายละเอียดเกี่ยวกับน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์
2. รายละเอียดเกี่ยวกับโซลเวนต์ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรม
3. รายละเอียดเกี่ยวกับสารเบนซีน
 - 3.1 กลไกการเปลี่ยนแปลงในร่างกาย
 - 3.2 การเกิดเมแทบอลิซึมในร่างกาย (Metabolism)
4. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
5. สรุปแนวคิดจากการทบทวนวรรณกรรม
ซึ่งในแต่ละหัวข้อมียละเอียดดังต่อไปนี้

1. รายละเอียดเกี่ยวกับน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์

1.1 แก๊สโซลีน (Gasoline)

ชื่ออื่นๆ Petrol, Motor fuel, motor spirit, casing head gasoline, natural gasoline

ลักษณะสารและการใช้ประโยชน์

แก๊สโซลีนหรือที่คนไทยเรียกน้ำมันเบนซิน (Benzine, Benzin, ligroin) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียมที่จุดระเหยต่ำ (60-110 C) ใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ แก๊สโซลีนเป็นของผสมไฮโดรคาร์บอนระหว่าง พาราฟินที่เป็นกิ่งสาขา (Branched-chain paraffins) พาราฟินที่เป็นวง (Cycloparaffins) ทั้งชนิดอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว (Unsaturated cyclic alkenes/Unsaturated cyclic olefins) และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) เช่น เบนซีน หรืออัลคิลเบนซีน (Alkylbenzene) ด้วยสัดส่วนแตกต่างกัน หรือเป็นสารผสมที่มีอัลเคน (C4-C10) เป็นส่วนใหญ่ และมีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนน้อย ปรี้อาจจะมีอัลคีน และอันไคน์บ้าง

ตัวอย่างส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง (คิดเป็นร้อยละโดยปริมาตร) คือ อัลเคน 4-8%, ไอโซอัลคีน 25-40 %, ไฮโคลอันเคน 3-7%, อัลคีน 2-5 %, ไฮโคลอัลคีน 1-4 % และสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 20-50% (IARC,1889)

โดยอัลเคนที่เดิมจะมีตั้งแต่ Butane(C4) ถึง Decane(C10) โดยส่วนใหญ่เป็น Octane และในกรณีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน มีกฎหมายบังคับในแต่ละประเทศสำหรับเบนซินแตกต่างกันไป สหรัฐอเมริกาและแคนาดากำหนดให้เบนซินไม่เกิน 1% ประเทศไทยกำหนดไว้ไม่เกิน 3.5% นอกจากนี้ ยังมีการเติมสารเคมีที่ไม่ใช่กลุ่มไฮโดรคาร์บอน เช่น สารป้องกันเครื่องยนต์ กระตุก สารป้องกันออกซิเดชัน สารป้องกันสนิม เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพน้ำมันเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น และเติมสีข้อมเพื่อให้เป็นที่สังเกตเห็นได้ง่าย

ค่าออกเทน (Octane number) คือค่าที่แสดงความต้านทานการน็อก ซึ่งตัวเลขนี้ได้จากการเปรียบเทียบกับ Isooctane (2,2,4-Trimethylpentane) และ Heptane เนื่องจากสาร Isooctane เป็นสารที่มีกิ่งสาขามาก เมื่อเกิดการเผาไหม้มีการน็อกมาก จึงถือว่าค่าออกเทนเป็น 0 ดังนั้นน้ำมันที่มีออกเทนเป็น 70 คือ น้ำมันที่มีค่าการน็อกเท่ากับสารผสม Isooctane 70%+Heptane 30% ดังนั้นน้ำมันเชื้อเพลิงบางชนิดมีค่าออกเทนน้อย จึงต้องมีการเติมสารบางชนิดลงไปเพื่อปรับปรุงค่าออกเทน เช่น สารตะกั่วอินทรีย์ (Tetraethyl lead) Methyl tertiary-butyl ether (MTBE) เพื่อลดการน็อกของเครื่อง และเพิ่มค่าออกเทน น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถขับเคลื่อนทั่วไปต้องการค่าออกเทนประมาณ 90 ส่วนน้ำมัน เชื้อเพลิงเครื่องบินมีค่าออกเทน 100 ขึ้นไป

การเกิดพิษ

ผู้ได้รับพิษจากแก๊สโซลีน มักเป็นผู้ที่ทำงานในสถานีจำหน่ายน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการหายใจเอาไอระเหยของสารเข้าไป การเกิดพิษจากแก๊สโซลีนนั้น นอกจากพิษต่อระบบประสาทส่วนกลาง พิษระคายเคืองที่ผิวหนัง และเยื่อต่างๆ เนื่องจากสารทำลายอินทรีย์แล้ว ยังมีพิษเนื่องจากสารเคมีแต่ละตัวที่เป็นส่วนผสมอยู่ และอาจเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ต่อกันระหว่างสาร ทำให้การทำนายเรื่องพิษโดยรวมทำได้ยาก

1.2 น้ำมันดีเซล (Diesel oil)

ส่วนประกอบหลัก คือ พาราฟินที่ไม่แยกกิ่งสาขา (Unbranched paraffins) มีคาร์บอนหลายตัวใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ประสิทธิภาพของน้ำมันวัดจากค่า Cetane ซึ่งปกติมีค่าตั้งแต่ 10-80 โดยสารไฮโดรคาร์บอนที่ความยาวสายน้อย ค่าตัวเลข Cetane จะน้อยตัวอย่างเช่น n-Decane มีค่า Cetane=76, n-Hexadecane มีค่า Cetane =100 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานการจุดไฟ

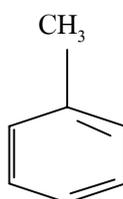
2. รายละเอียดเกี่ยวกับโซลเวนต์ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรม

โซลเวนต์เป็นารเคมีกลุ่มสารละลายอินทรีย์มีหลายประเภท แต่ที่นิยมนำมาใช้และมักใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสี ผลิตเม็ดพลาสติก ทำกาวย เคลือบสี ตู้ซ่อมรถยนต์และเป็นส่วนผสมของน้ำมันปิโตรเลียม ประเภทที่ใช้หลักๆ ที่พบมี 4 ประเภท คือ ไซลีน โทลูอิน เอทิลอะซิเตด และเบนซีน สำหรับคุณสมบัติของสารแต่ละประเภทดังกล่าวนี้ ส่วนใหญ่เป็นของเหลวไวไฟมาก มีพิษดังนี้

2.1 โทลูอิน (toluene)

สูตรโมเลกุล (Molecular formula) : $C_6H_5CH_3$

สูตรโครงสร้าง (Structure formula) :



ชื่ออื่น ๆ (Synonyms) : methybenzene, toluol, phenylmethane, methacide

ลักษณะสารและการใช้ประโยชน์

โทลูอิน เป็นผลพลอยได้ (By-product) ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และถ่านหิน โทลูอินเป็นสารทำละลายตัวหนึ่งที่ใช้มากในอุตสาหกรรมยา เคมี ยาง พลาสติก หนังเทียมเส้นใย การเคลือบกระดาษ หมึกพิมพ์ เป็นวัตถุดิบตั้งต้นและเป็น Intermediate ในอุตสาหกรรมอินทรีย์เคมี และอุตสาหกรรมสารสังเคราะห์เคมี เป็นองค์ประกอบในสูตรผสมน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ เป็นทินเนอร์ (Thinner) ในสี แล็กเกอร์ และน้ำมันชักเงา เป็นสารขจัดหรือล้างสี (Piant remover)

การแพร่กระจายของสารเคมีทางชีววิทยา (Chemobiokinetics)

โทลูอิน ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางหายใจดูดซึมทางปอด และดูดซึมได้บ้างทางผิวหนัง เพราะละลายได้ดีกับไขมันจึงสะสมอยู่ได้ในอวัยวะที่มีไขมัน มีค่าครึ่งชีวิตในร่างกายเพียง 3-4 ชั่วโมง ดังนั้นหากหยุดการได้รับเข้าไป ก็จะถูกขับออกจากร่างกายได้อย่างรวดเร็ว ปริมาณที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมีน้อยกว่า 10% ที่จะถูกขับออกทางลมหายใจออกโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปที่เหลือจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดฮิปปูริก (Hippuric acid) เป็นหลัก

การได้รับสัมผัสโทลูอิน ถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะในรูปของกรดฮิปปูริก ปริมาณที่ขับออกมากับปัสสาวะในคนปกติทั่วไป จะขึ้นอยู่กับแต่ละบุคคลและอาหารที่รับประทาน

จากรายงานการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณกรดฮิฟพิวริก ที่ขับออกมากับปัสสาวะในคนปกติทั่วไป ประมาณ 0.7 กรัมต่อวัน สำหรับในคนงานที่ต้องสัมผัสกับโทลูอินที่ฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศการทำงาน ปริมาณกรดฮิฟพิวริกที่ขับออกมากับปัสสาวะ จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณความเข้มข้นของโทลูอินในอากาศคือ ถ้าคนงานสูดหายใจเอาโทลูอินในอากาศที่เข้มข้นในช่วง 100-600 ppm เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณกรดฮิฟพิวริกที่ขับออกมากับปัสสาวะประมาณ 1.2 กรัมต่อวัน ซึ่งสูงกว่าในคนงานที่สูดหายใจโทลูอินในอากาศที่เข้มข้นประมาณ 100 ppm และจะขับออกมากับปัสสาวะประมาณ 0.367 mg/l

ความเป็นพิษ (Toxicity)

โทลูอิน มีฤทธิ์เฉียบพลันกดระบบประสาทส่วนกลางได้รุนแรงกว่าเบนซีน คนงานที่อยู่ในบรรยากาศของความเข้มข้น 200 ppm เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะเกิดอาการเหนื่อยล้าอ่อนแรง สับสน ผิวน้ำรู้สึกสัมผัสเพี้ยน (Paresthesia) อาการเหนื่อยอ่อนจะเป็นอยู่หลายชั่วโมงที่ความเข้มข้น 400 ppm จะทำให้รู้สึกใจสับสน ที่ความเข้มข้น 600 ppm จะทำให้เกิดอาการรู้สึกกระเจิงสุข (Exhilaration) เหนื่อยอ่อนอย่างมาก สับสน คลื่นไส้ ปวดศีรษะ วิงเวียน ภายใน 3 ชั่วโมงจะมีอาการเกิดขึ้นอย่างมาก และที่ความเข้มข้น 1000 ppm ขึ้นไป จะทำให้รู้สึกบ้านหมุน (Vertigo) ปวดศีรษะรุนแรง ความเข้มข้นที่สูงขึ้นไปจะทำให้โคมา ประสาทหลอน ซึ่งการทำให้ประสาทหลอนนี้เอง เป็นเหตุผลการที่มีโทลูอินเป็นส่วนผสม ถูกนำมาใช้ดมเสพติด

ในความเข้มข้นที่ต่ำ ๆ มักมีอาการเหนื่อย อาการรู้สึกไม่สบายแบบบอกไม่ถูก ซึ่งคนงานจะรู้สึกเป็นตอนไปเริ่มงานกะใหม่ ทำให้ดูเหมือนกับอาการนั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับงานที่ทำผ่านมา

พิษที่แตกต่างกับเบนซีน ก็คือ การไม่มีพิษต่อระบบเลือดอย่างถาวร เนื่องจากโทลูอินไม่มีฤทธิ์กดการทำงานของไขกระดูก และไม่มีพิษต่อดับ ไม่มีผลต่อระบบประสาทส่วนปลายและในภาวะที่ได้รับสัมผัสจากการทำงานตามปกติ ไม่มีหลักฐานแน่ชัดว่าทำให้เกิดการทำลายเนื้อสมอง และการได้รับสัมผัสโทลูอินจากการทำงาน ไม่ได้ทำให้เกิดผลต่อเนื่องถาวรทางจิตประสาทเสมอไป

ข้อเสนอแนะและกลไกทางกฎหมาย (recommendations/legal mechanisms)

มาตรการควบคุมภายในประเทศ

ประเทศไทยได้กำหนดให้โทลูอิน จัดเป็นวัตถุอันตรายประเภทที่ 3 ได้แก่ วัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ครอบครอง ต้องได้รับใบอนุญาตจากกรมโรงงาน

อุตสาหกรรม ซึ่งกรมแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม ได้กำหนดค่ามาตรฐาน ปริมาณความเข้มข้นของโทลูอินในสถานประกอบการดังนี้

1. ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติไม่ควรเกิน 200 ppm
2. ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเวลาที่จำกัด คือระยะเวลาที่กำหนดให้
3. ทำงาน 10 นาที ไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 500 ppm
4. ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีได้ 300ppm

มาตรการควบคุมของต่างประเทศ

ประเทศสหรัฐอเมริกาโดย ACGIH, 2003 กำหนดค่า

ค่าจำกัดของสารเคมีในอากาศ (Threshold Limit Values : TL Vs)

TL.V—TWA = 50 ppm

ค่าดัชนีของสารเคมีในร่างกาย (Biological Exposure Indices;BEIs)

กรดฮิพิวริคในปัสสาวะหลังการทำงานไม่ควรเกิน 1.6 g/g creatinine

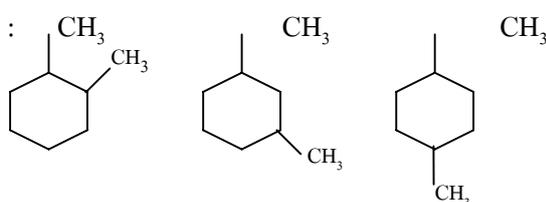
ออร์โทครีซอล (o-Cresol) ในปัสสาวะหลังการทำงาน ไม่ควรเกิน 0.5 mg/I

2.2 ไซลีน (Xylene)

ไซลีน เป็นสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ในทางการค้า ไซลีนเป็นสารผสมของ ไซลีน 3 ไอโซเมอร์ คือ o-Xylene 30% , m-Xylene 60-70% และ p-Xylene 5% ไซลีนมีสถานะเป็น ของเหลว ไม่มีสี (สำหรับ p-Xylene ที่บริสุทธิ์ เป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 12.7 °C)

สูตร โมเลกุล : $C_6H_4(CH_3)_2$

สูตร โครงสร้างเคมี :



O-Xylene

m-Xylene

p-Xylene

ชื่ออื่น ๆ : dimethylbenzene : xylain : xylol

ลักษณะสารและการใช้ประโยชน์

ไซลีน ได้จากการกลั่นน้ำมันดำ ถ่านหิน และปิโตรเลียม ตามระบบการจำแนกสารของ UN (United Nations Classification System) จำแนกเป็นสารอันตราย จัดอยู่ใน Class 3 เป็นของเหลวไวไฟ ไซลีนมีการใช้ และพบในรายงานการเกิดพิษน้อยกว่าโทลูอิน เนื่องจากคุณสมบัติที่ระคายเคืองและกลิ่นไม่ดี ทำให้ไม่นิยมใช้ทั้งที่มีคุณสมบัติการเป็นตัวทำละลายคล้ายคลึงกันแต่ก็มีการใช้เป็นทินเนอร์ในสีทา เป็น Intermediete ในอุตสาหกรรมพลาสติกเส้นใยสังเคราะห์ เป็นสารทำละลายในหมึก ยาง กาว เรซิน และแลคเกอร์ เป็นารจัดสีในอุตสาหกรรมเคลือบกระดาษ เป็นสารล้างคราบน้ำมันในอุตสาหกรรมพลาสติก อิเล็กทรอนิกส์เป็นสารทำละลายและเป็น Emulsifier ในการผสมสารเคมีที่ใช้ทางการเกษตร และใช้ผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีและชีวของสารเมื่อเข้าสู่ร่างกาย (Chemobiokinetic)

การเข้าสู่ร่างกายของไซลีนส่วนใหญ่ผ่านทางผิวหนังและการหายใจ เมื่อผ่านเข้าทางผิวหนังจะมีผลก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังรุนแรงยิ่งกว่า การสัมผัสสารเบนซีนและโทลูอิน ส่วนการเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ เมื่อเข้าสู่ปอดจะส่งผ่านเข้าสู่ระบบหมุนเวียนของกระแสโลหิต ปริมาณของไซลีนที่ดูดซึมเข้าร่างกายเกือบทั้งหมด จะถูกขับออกจากร่างกายในรูปของสารเมแทบอลิท์ และมีปริมาณน้อยกว่า 5% ที่ขับออกมาที่ลมหายใจออก โดยไม่ถูกเปลี่ยนแปลงในร่างกาย ช่องทางการเปลี่ยนรูปภายในร่างกายจะคล้ายกับของโทลูอิน โดยจะถูกขับออกทางปัสสาวะในรูปของกรดเมทิลฮิปปูริก (Methylhippuric acid)

ความเป็นพิษ (Toxicity)

ความเป็นพิษจากการสัมผัสแบบเฉียบพลัน (Acute exposure) จะเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสสารไซลีนที่มีความเข้มข้นมากกว่า 200 ppm อาการที่เกิดขึ้นคือ อาการมึนงง ปวดศีรษะ คลื่นเหียน อาเจียน อาการเสียวคอ และหน้าอก อาการทางระบบทางเดินหายใจ ได้แก่ อาการไอ และน้ำมูกไหล ระคายเคืองต่อผิวหนังและตา

การสัมผัสแบบเรื้อรัง (Chronic exposure) อาการที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสสาร ไซลีน เป็นระยะเวลานานอย่างต่อเนื่องกัน เมื่อสัมผัสกับฟุ้ง (Fumes) นานติดต่อกันจะทำให้เยื่อตาอักเสบ ผิวหนัง และจมูกแห้ง คอแห้ง ถ้าสัมผัสกับของเหลวโดยตรงผิวหนังจะเป็นสะเก็ด หรือเป็นโรคผิวหนังชนิดรุนแรง ถ้าหายใจเอาไอเคมีเข้าไป จะมีผลไปกระตุ้น และกดระบบประสาทส่วนกลาง เช่น เกิดอาการชา สั่นกระตุก หวาดกลัว ความจำเสื่อม อ่อนเพลีย จิตใจกระวนกระวาย ทรงตัว-ลำบาก เบื่ออาหาร คลื่นเหียน และท้องอืด จากการสังเกตในคนไข้ ตรวจพบว่า เนื้อเยื่อมีจำนวน

เซลล์เพิ่มขึ้นมากผิดปกติ (Hyperplasia) ตับโตขึ้นเล็กน้อย เนื้อเยื่อหรือกลุ่มเซลล์บางส่วนตาย (Necrosis) และเป็นโรคไต

ข้อเสนอแนะและกลไกทางกฎหมาย (recommendations/legal mechanisms)

มาตรการควบคุมในประเทศ

- กรมแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม ได้กำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นของไซลีนในบรรยากาศการทำงานปกติไม่ควรเกิน 100 ppm หรือ 435 mg/m³

- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ที่ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน ฉบับที่ 2 เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีปริมาณ ไซลีนเจือปนไม่เกินค่าที่กำหนดไว้สำหรับการผลิตทั่วไป เท่ากับ 200 ppm หรือ 870 mg/m³

- TLV – TWA = 100 ppm

- TLV – STEL = 150 ppm

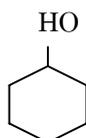
ค่าดัชนีของสารเคมีในอากาศ (Threshold Limit Values; TLVs)

กรดเมทิลฮิพิวริกในปัสสาวะหลังการทำงานไม่ควรเกิน 1.5 g/g creatinine

2.3 ฟีนอล (Phenol)

สูตรโมเลกุล : C₆H₅OH

สูตรโครงสร้าง :



ชื่ออื่น ๆ : acidum carbolicum, acidum phenolicum, acidum phenylicum, benzaphenol, benzene phenol, benzenol carbolic acid, hydroxybenzene (IUPAC), oxybenzene, monohydroxybenzene, monophenol, phenic acid, phenol alcohol, phenyl hydrate, phenyl hydroxide, phenylic acid

ลักษณะสารและการใช้ประโยชน์

ฟีนอลมีลักษณะของผลึกสีขาวสามารถละลายได้ที่ 43 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนละลายน้ำได้ดี ฟีนอลเป็นผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมถ่านหิน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ฟีนอลเป็นสารที่ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ และอุตสาหกรรมปฏิกิ ถ่านหิน สี สีเคลือบสารกัน รานไม้ สังกะหรณ์เรซิน กาว ยา สิ่งทอ พลาสติก ปีโตรเลียม กระจก ยาสี ย้อมค้ำนการเกษตรใช้ เป็นสารขจัด และล้างสี

การแพร่กระจายของสารเคมีทางชีววิทยา (Chemobiokinetics)

ฟีนอล ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายส่วนใหญ่ม่านเข้าไปโดยการหายใจ และทางผิวหนัง ซึ่ง ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังได้ ฟีนอลที่เข้าสู่ร่างกายบางส่วนถูกออกซิไดซ์ในร่างกาย ประมาณ 23% โดยเปลี่ยนไปเป็นไฟโรแคทิกอล และไฮโดรควิโนน ส่วนใหญ่จะถูกขับออกทาง ปัสสาวะประมาณ 72% ในรูปของฟีนอลอิสระ 48% และคอนจูเกตฟีนอล (Conjugated phenol) 52%

ความเป็นพิษ (Toxicity)

ฟีนอลในร่างกายจะไปกระตุ้นการทำงานของ PHS ในตับ ซึ่งเปลี่ยนไฮโดรควิโนนให้ กลายเป็น Phenoxy radical ที่สามารถเข้าไปจับกับสารพันธุกรรมดีเอ็นเอ และโปรตีนในเซลล์ไข กระดูนำไปสู่พิษกดไขกระดูก และมะเร็งของระบบเลือดได้ ดังแสดงในภาพที่ 3

มาตรการควบคุมของต่างประเทศ

ค่าความปลอดภัยในการทำงาน (Occupational safety standards) ประเทศสหรัฐอเมริกาโดย ACGIH, 2003 กำหนดค่า

TLV-TWA = 5 ppm

ค่าดัชนีของสารเคมีในร่างกาย (Biological Exposure Indices; BEIs)

ฟีนอลในปัสสาวะหลังการทำงานไม่ควรเกิน 50 mg/g creatinine

3. รายละเอียดเกี่ยวกับสารเบนซีน

เบนซีน (Benzene)

สูตรทางเคมี : C_6H_6 [C 92.55%, H 7.75%]

สูตร โครงสร้างเคมี :



ชื่ออื่น ๆ : Annulene , Benzol , Benzin , Coal naphtha , Motor benzol

ลักษณะสารและการใช้ประโยชน์

เบนซีนเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยง่าย มีกลิ่นหอม ละลายได้ในน้ำ เบนซีนเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารทำละลายผสมที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียมที่อุณหภูมิจุดกลั่นต่ำ และการเผาถ่านหิน เป็นสารเคมีบริสุทธิ์ซึ่งต่างจากเบนซีน (Benzine) หรือน้ำมันเบนซีน

เบนซีน เป็นสารเริ่มต้นในกระบวนการสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมเคมีหลายชนิด เช่น สารปราบศัตรูพืช พลาสติก สี ย้อม ในกิจการที่เกี่ยวกับยานยนต์ เครื่องจักรหรือเครื่องกลเกี่ยวกับปิโตรเลียม ถ่านหิน สารเคมี เรซิน แล็กเกอร์ เคมีใช้เป็นสารทำละลายในอุตสาหกรรม ซึ่งใช้กันเป็นปริมาณมากอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ละลายกาว ยาง สีทาบ้าน ล้างคราบมัน แต่เนื่องจากปัจจุบันมีความเป็นพิษมาก จึงถูกห้ามใช้

เบนซีน ใช้เป็นส่วนผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ ประเทศไทยอนุญาตให้มีเบนซีนผสมอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงได้ไม่เกิน 3.5 % ซึ่งมีกระทรวงพาณิชย์เป็นผู้กำหนดคุณภาพ (ประกาศกระทรวงพาณิชย์ ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2541) ในขณะที่สหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ไม่เกิน 1% ส่วนบางประเทศในยุโรปอนุญาตให้ไม่เกิน 5% แต่ในบางประเทศที่ยังมีการใช้เบนซีนเป็นสารทำละลายในอุตสาหกรรมรองเท้ายาง และรองเท้าพลาสติก การพิมพ์รูปลงงาน พบว่าโอกาสการรับสัมผัสสารของคนงานมีได้สูงมาก

ระดับอ้างอิงทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Reference Limit)

ระดับความเข้มข้นที่อนุญาต ให้มีได้ของเบนซีนในบรรยากาศ ถูกกำหนดขึ้นโดยหลายหน่วยงานรายละเอียด ดังนี้

มาตรการควบคุมในประเทศ

ค่าจำกัดของสารเคมีในอากาศ (Threshold Limit Values; TLVs)

กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม กำหนดค่า

- TLV-TWA = 10 ppm
- TLV – STEL = 50 ppm (สำหรับการสัมผัส 10 นาที)
- TLV – C = 25 ppm

มาตรการควบคุมในต่างประเทศ

ค่าจำกัดของสารเคมีในอากาศ

ACGIH, 2003 กำหนดค่า

- TLV – TWA = 0.5 ppm
- TLV – STEL = 2.5 ppm

ค่าดัชนีของสารเคมีในร่างกาย (Biological Exposure Indices; BEIs)

การได้รับสัมผัสเบนซีนจากสิ่งแวดล้อม ACGIH, 2003 กำหนดค่า

- กรดมิวโคนิกในปัสสาวะหลังการทำงานไม่ควรเกิน 500 $\mu\text{g/g}$ creatinine
- กรดเฟนิลเมอแคปทริกในปัสสาวะหลังการทำงานไม่ควรเกิน 25 $\mu\text{g/g}$ creatinine การได้รับสัมผัสเบนซีนจากการประกอบอาชีพ ACGIH, 1996 กำหนดค่า
- ฟีนอลในปัสสาวะหลังการทำงานไม่ควรเกิน 50 mg/g creatinine

การเฝ้าระวังทางสุขภาพ

ตรวจสุขภาพทั่วไป-ตรวจสุขภาพพิเศษ ได้แก่ ตรวจผิวหนัง ตา หู ตรวจระบบทางเดินหายใจ กล้ามเนื้อ การทำงานของตับ ไต ปอด หัวใจ สมอ และระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร ตรวจเบนซีนในเลือด เบนซีนในลมหายใจ ระดับฟีนอลในปัสสาวะ ตรวจสภาพจิตและพฤติกรรมของกลุ่มคนที่มีความเสี่ยงจากการประกอบอาชีพ

3.1 กลไกการเปลี่ยนแปลงในร่างกาย (Pharmacokinetics and Metabolism)

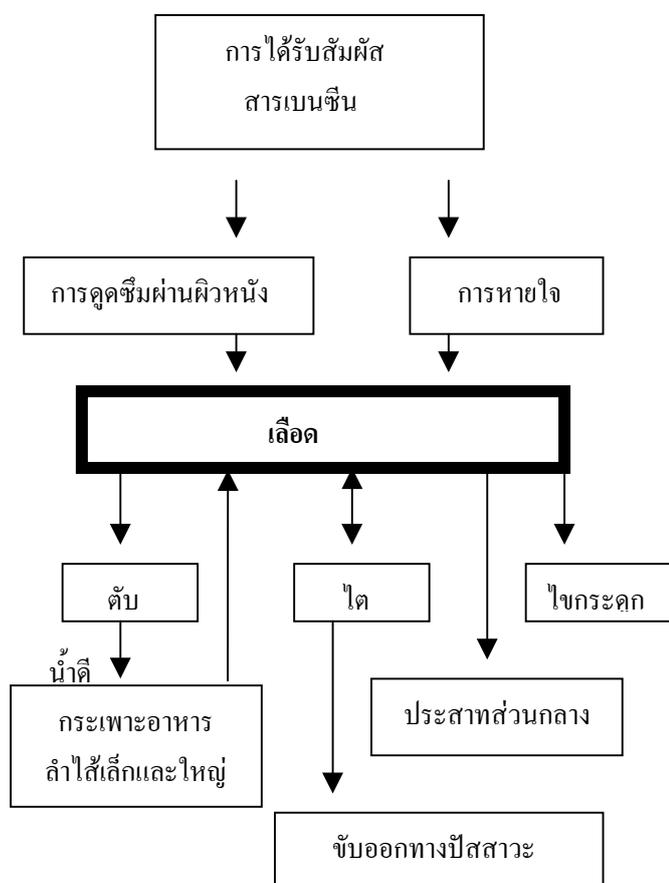
สารเบนซีนเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังทำให้เกิดการระคายเคือง ผิวหนังแห้ง คันและอักเสบ อาจมีอาการติดเชื้อซ้ำ และเป็นสาเหตุของปฏิกิริยาภูมิแพ้ทางการหายใจ ทำให้เกิดการระคายของปอด แล้วถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ทันที เพราะมีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมัน จากนั้นก็จะกระจายไปสะสมในเนื้อเยื่อไขมัน แพร่กระจายออกไป และทำความเสียหายให้แก่อวัยวะอื่นๆ ของร่างกายดังนี้คือ

ตับ ทำหน้าที่กำจัดพิษ แล้วส่งต่อไปที่กระเพาะอาหาร และลำไส้โดยน้ำดี หลังจากนั้นก็นกลับไปที่เลือดอีกครั้ง จากขบวนการดังกล่าวพบว่า มีผลทำให้เกิดโรคตับแข็ง

ไต ทำหน้าที่กรองของเสีย แล้วดูดซึมกลับไปที่เลือดอีกครั้ง และบางส่วนถูกขับออกทางปัสสาวะ

กระดูก มีผลต่อไขกระดูกซึ่งเป็นอวัยวะสร้างเม็ดเลือด ทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง (Aplastic anemia) ไขกระดูกถูกทำลาย (Myelotoxicity) เกิดความผิดปกติของโครโมโซม

ประสาทส่วนกลาง ทำอันตรายระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เกิดการชัก อ่อนเพลียของกล้ามเนื้อ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผลของเบนซีนที่มีต่อร่างกายมนุษย์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (CheryI Gussenhoven, 2000)

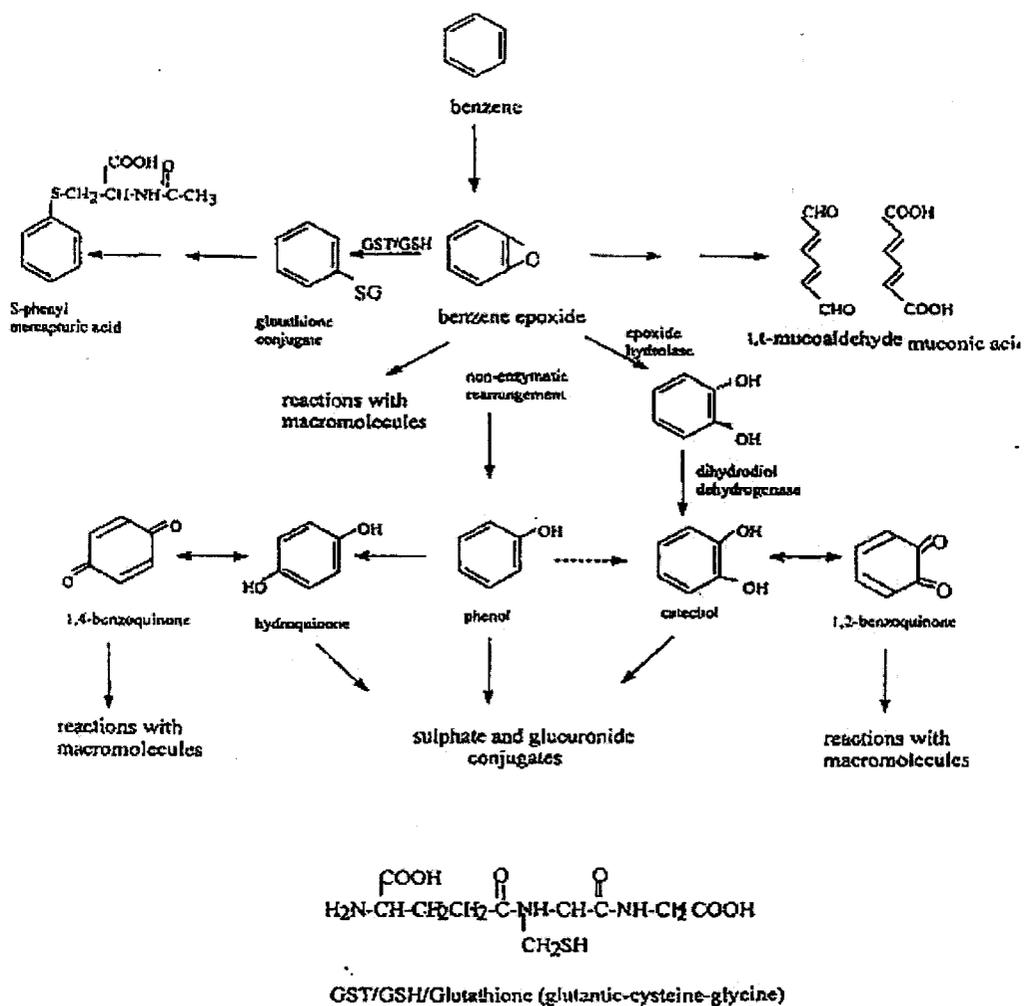
3.2 การเกิดเมแทบอลิซึมในร่างกาย (Metabolism)

เบนซีน ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้จากทุกช่องทางของร่างกาย เช่น ทางการหายใจทางปาก หรือทางผิวหนัง ในโรงงานอุตสาหกรรมมักเกิดพิษจากการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ (ทางปอด) และทางผิวหนัง

เบนซีน ละลายกับไขมันได้ดีจึงสะสมในเนื้อเยื่อไขมันของร่างกายได้มาก ซึ่งเนื้อเยื่อไขมันจะทำตัวเสมือนเป็นแหล่งเก็บในร่างกาย สำหรับเบนซีน เบนซีนจำนวนมากที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย จะถูกขับออกในรูปเดิมทางลมหายใจออก แต่ก็มีได้ 15-60% ของจำนวนที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย (ขึ้นอยู่กับสภาวะของร่างกาย และปริมาณรวมของสารเบนซีนในร่างกาย) ที่จะถูกกระบวนการภายในร่างกายเปลี่ยนแปลงรูปไป (Biotransformed) การเปลี่ยนแปลงรูปภายในร่างกายของเบนซีนมีความซับซ้อน โดยในขั้นแรก คือ การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) โดยเอนไซม์ที่ใช้ Cytochrome P 450 (CY2E1) ไปเป็นสารเมแทบอลิท์ที่มีพิษ คือ เบนซีนอีพอกไซด์ (Benzeneepoxide) ซึ่งก็เหมือนกับสารกลุ่มอีพอกไซด์ทั่วไป ที่ว่องไวมากต่อปฏิกิริยาเคมี (Highly reactive) และอาจจับกับสารชีวเคมีโมเลกุลใหญ่ในร่างกายได้ เช่น โปรตีนอัลบูมิน ฮีโมโกลบิน กรดนิวคลีอิก ทำให้สารชีวเคมีเหล่านี้เสียประสิทธิภาพการทำงานไป จึงมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกาย

สารเบนซีนอีพอกไซด์ ยังเปลี่ยนแปลงภายในร่างกายต่อไปได้หลายเส้นทาง เช่น อาจเปลี่ยนแปลงรูปต่อไปได้เอง กลายเป็นฟีนอลหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อภายในร่างกาย เช่น อาจถูกเติม H_2O (Hydrate) เข้าไปในโครงสร้างเคมี และถูก Reduced ไปเป็นสารแคทาคอล (Catechol) หรือสารเบนซีนอีพอกไซด์ ไปจับกับกลูตาไธโอน (Glutathione) ซึ่งเป็นสารชีวเคมีภายในร่างกายแล้วเปลี่ยนรูปต่อไป กลายเป็นสารอนุพันธ์ของกรดเมอแคปทิวริก (Mercapturic acid) ซึ่งไม่มีพิษ เส้นทางที่เกิดเมแทบอลิซึมของเบนซีน ดังแสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 2 เส้นทางที่เกิดเมแทบอลิซึมของเบนซีนภายในร่างกาย



ภาพที่ 2 เส้นทางการเกิดเมแทบอลิซึมของเบนซีนภายในร่างกาย
(กรรณิการ์ นัตร์สันติประภา, 2546)

ดังนั้นเมแทบอลิท์ของเบนซีนที่มีโอกาสตรวจพบในร่างกายจึงมีหลายตัว เช่น ฟีนอลแคทีกอบ ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone หรือ Quinol) 1,2-เบนโซควิโนน (1,2-Benzoquinone) 1,4-เบนโซควิโนน (1,4-Benzoquinone), 1,2,4-เบนซีนไตรออล (1,2,4-Benzenetriol) แต่เมแทบอลิท์ที่มีมากที่สุดคือ ฟีนอล และเมแทบอลิท์ที่จับกับสารชีวเคมีภายในร่างกายทำให้มีพิษมากกว่าเบนซีนเอง ซึ่งนอกเหนือจากเบนซีนอีปอกไซด์ก็คือ 1,2-เบนโซควิโนน และ 1,4-เบนโซควิโนน เบนซีนมีค่าครึ่งชีวิตในร่างกาย (Biological half-life) ไม่เกิน 5 ชั่วโมง

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute toxicity)

เมื่อได้รับเบนซีนเป็นปริมาณมากอย่างเฉียบพลัน มักทำให้มีอาการทางระบบประสาทส่วนกลางอย่างเด่นชัด อาการเริ่มแรกประกอบด้วยความรู้สึกเคลิบเคลิ้มเป็นสุขเกินจริง วิงเวียน ปวดศีรษะ และอาเจียน แต่ก็อาจมีผลต่อหัวใจด้วย โดยกระตุ้นให้หัวใจเกิดภาวะไวต่อสาร (Cardiac sensitization) ทำให้หัวใจเต้นผิดปกติ ถ้าได้รับเป็นปริมาณมาก และอาการพิษรุนแรงมักตรวจพบทางพยาธิวิทยาได้ว่าเกิดการอักเสบของทางเดินหายใจ มีน้ำคั่งและเลือดออกในปอด เลือดคั่ง ไตบวม และน้ำคั่งในสมอง เบนซีนยังระคายเคืองมากทั้งต่อเยื่อตา กระจกตา และผิวหนัง การสัมผัสเป็นเวลานานจะทำให้ผิวหนังไหม้ ผิวหนังถูกกระตุ้นให้เกิดภาวะภูมิไว เมื่อได้รับเข้าร่างกายทางการหายใจ ระคายเคืองทางเดินหายใจ และปอด

ในสัตว์ทดลอง ค่า LD_{50} (ขนาดสารที่ทำให้จำนวนสัตว์ทดลองตายเฉียบพลัน 50%) ของเบนซีนเริ่มพบที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ส่วนในมนุษย์นั้นความเข้มข้นของเบนซีนขนาด 20,000 ppm เคยมีรายงานว่าทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 5-10 นาที สำหรับความเข้มข้น 7,500 ppm พบว่าทำให้เกิดอาการพิษเฉียบพลันรุนแรงได้ภายในเวลา 30-60 นาที และการได้รับสัมผัสต่อความเข้มข้น 3,000 ppm ภายในเวลาอันสั้นจะทำให้ระคายเคืองต่อเยื่อตา และทางเดินหายใจอย่างมาก และที่ความเข้มข้น 250 ppm จะทำให้เกิดความรู้สึกบ้านหมุน ง่วงซึม ปวดศีรษะ และคลื่นไส้

การได้รับเบนซีนเข้าร่างกายทางปาก จะทำให้เกิดอาการพิษต่อร่างกายอย่างเป็นระบบได้รุนแรงกว่าการได้รับสารกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbons) ปริมาณสารที่ทำให้มนุษย์เสียชีวิต (Fatal dose) คือ 0.2 ml/kg หรือ 10-15 ml ในผู้ใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเพียง 2-5 ml ก็เคยพบว่าทำให้เสียชีวิตได้เช่นกัน

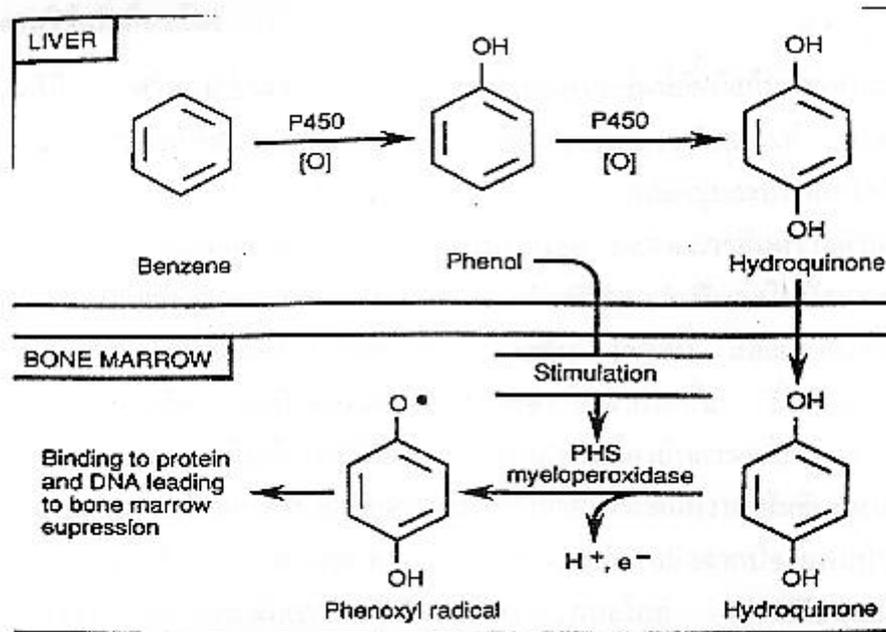
ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic toxicity)

ความเป็นพิษของเบนซีนที่ต่างจากสารละลายอินทรีย์ทั่วไปคือ ความเป็นพิษต่อไขสันหลัง (Myelotoxic) หรือไขกระดูกเป็นหลัก ซึ่งมักแสดงผลโดยความผิดปกติของจำนวนเม็ดเลือดแดง ปริมาณฮีโมโกลบิน จำนวนเกร็ดเลือด จำนวนเม็ดเลือดขาว ที่มีรายงานมากที่สุด คือ จำนวนเม็ดเลือดขาวลดลง แต่ในช่วง ปี ค.ศ. 1910-1920 เคยมีการนำเบนซีนมาใช้รักษาเพื่อลดจำนวนเม็ดเลือดขาวในกระแสเลือด สำหรับคนไข้มะเร็งเม็ดเลือดขาว ด้วยอาการทางเลือดเหล่านี้อาจฟื้นกลับคืนเป็นปกติได้ ถ้าหยุดการรับสัมผัสเบนซีนได้เร็วพอ

อาการช่วงแรก ๆ ของความเป็นพิษต่อไขกระดูกแบบเรื้อรังมักไม่แสดงออก ส่วนอาการที่แสดงออกก็ไม่จำเพาะต่อพิษนี้ และไม่สัมพันธ์กับระดับความรุนแรงที่เกิดกับไขกระดูก อาการที่มักพบได้ก่อนคืออาการเหนื่อยเพลีย ความผิดปกติอย่างอ่อนในทางเดินอาหาร และรู้สึกมีน้ำหรือเวียนศีรษะ แล้วตามมาด้วยอาการเลือดออกจากผิวหนัง เชื้อราในปาก และมีผื่นแดงที่ผิวหนัง

ในคนงานที่ได้รับสัมผัสเบนซีนเป็นเวลานาน มักตรวจพบโรคโลหิตจางได้เสมอ โดยในช่วงแรก ๆ เม็ดเลือดจะเพิ่มจำนวน (Hyperplastic) พบอาการทางคลินิกแรกสุดก็คือ การเพิ่มจำนวนเม็ดเลือดขาว (Leukocytes) และถ้ายังไม่หยุดได้รับ ต่อมาเม็ดเลือดจะลดจำนวนพร้อมกับการทำลายขององค์ประกอบระดับเซลล์ของเม็ดเลือดทั้งหมด ทำให้เกิดโรคโลหิตจางแบบไม่มีเม็ดเลือด เชื่อกันว่าสารที่ทำให้เกิดพิษนี้คือสารเมแทบอลิท์เบนซีนอีพอกไซด์ ซึ่งไปรบกวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอของโครโมโซม โดยในคนงาน หรือในสัตว์ทดลองที่ได้รับสัมผัสเบนซีนจะพบอัตราการความผิดปกติของโครโมโซมเพิ่มขึ้น มีผู้ทำการศึกษาพบว่า การได้รับสัมผัสเบนซีนมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว ซึ่งอาจเกิดแบบเฉียบพลันหลังได้รับสัมผัสทันที หรือที่ระยะเวลาหลายปี ระหว่างการได้รับสัมผัสครั้งสุดท้ายกับการเกิดโรครก็ได้

Rp zam KK.Klassen CD (2001) ด้วยระบบเมแทบอลิซึมของสารเบนซีนในระดับโดย Cytochrome CYP2E1 ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เฉพาะเจาะจงกับเบนซีน จะเปลี่ยนเบนซีนไปเป็นฟีนอล และฟีนอลถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไฮโดรควิโนน ซึ่งไฮโดรควิโนนบางส่วนสามารถเคลื่อนเข้าไปสะสมที่ไขกระดูก และในขณะที่ฟีนอลที่ถูกสร้างขึ้นจะไปกระตุ้นการทำงานของ PHS ในไขกระดูก โดยที่ PHS (Prostaglandin H Synthase) และ Myeloperoxidase ในไขกระดูกจะเปลี่ยนไฮโดรควิโนนให้เป็น Phenoxy radical ซึ่งสามารถเข้าไปจับกับสารพันธุกรรมดีเอ็นเอ และโปรตีนในเซลล์ไขกระดูก นำไปสู่การเกิดพิษกดทับไขกระดูก เกิดการตายของเซลล์เม็ดเลือดหรือเกิดเซลล์ผิดปกติ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งของระบบเม็ดเลือดได้ในที่สุด และสารบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นสารเมแทบอลิท์เพื่อขจัดออกทางปัสสาวะ ดังแสดงในภาพที่ 32 แสดงด้วยระบบเมแทบอลิซึมเบนซีนในระดับและไขกระดูก



ภาพที่ 3 บทบาท Cytochrome P450 และ Peroxidases ในขบวนการเมแทบอลิซึมของเบนซีนในตับและไขกระดูก (Rozman KK.Klassen CD, 200)

4. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นลินี ศรีพวง (2541) กรณีศึกษาผู้ประกอบการอาชีพที่สัมผัสกับสารทำลายอินทรีย์ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จากการเก็บตัวอย่างอากาศตรวจวิเคราะห์ พบสารเคมีกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ ไซลีน โทลูอิน เบนซีน และกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ อาซีโตน เมทิลเอทิลคีโตน (MEK) และเมทานอล ผลจากการสุ่มตรวจตัวอย่างปีศาจวะของคณงานในกลุ่มเสี่ยงตรวจพบกรดแมนเดิลิก กรดฮิพิวริก และฟีนอลในปีศาจวะของคณงานซึ่งเป็นสารเมแทบอลิท์ที่สอดคล้องกับการได้รับสารไซลีน โทลูอิน และเบนซีนที่เข้าสู่ร่างกาย นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความเข้มข้นของสารเคมีดังกล่าวในอากาศนั้น ขึ้นกับลักษณะของงานเป็นหลัก โดยพบว่าคณงานในห้องปฏิบัติการ ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการเตรียมสารและวิเคราะห์สารไฮโดรคาร์บอนจะมีโอกาสสัมผัสกับสารเคมีในอากาศในระดับความเข้มข้นที่มากกว่างานอื่น และผลจากการตรวจปีศาจวะหาสารเมแทบอลิท์ พบว่านอกเหนือจากปัจจัยภายใน คือ เพศ และสภาวะของร่างกายแล้วระดับความเข้มข้นของสารเมแทบอลิท์ ยังเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่

ทำงานสัมผัสกับสารอีกด้วย และโทลูอินมีผลรบกวน และ/หรือยับยั้งการกำจัดสารเมแทบอลิท์ของ เบนซีนและสารทำละลายอื่นคือ เมื่อระดับความเข้มข้นของกรดฮิฟิวริกมากขึ้นระดับความเข้มข้นของกรดแมนเดิลิก และ ฟีนอลจะลดลงในบางช่วงเวลาของการได้รับสัมผัสสารจากการทำงาน จากผลการศึกษาถึงแม้ว่าระดับความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศ และระดับความเข้มข้นของสารเมแทบอลิท์ในปัสสาวะ จะไม่เกินค่าความปลอดภัยของ ACGIH แต่ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสสารเคมีในอากาศโดยตรงมากกว่า 1 ชนิด ตลอดเวลาทำงาน

นิรันดร์ จันทรตระกูล (2541) อุตสาหกรรมเบา เช่น อุตสาหกรรมยาง ปาล์ม น้ำมัน อาหาร และเครื่องดื่ม อิเล็กทรอนิกส์ และเซมิคอนดักเตอร์ อุตสาหกรรมยิบซั่ม การถลุงดีบุก เครื่องกีฬา และอื่น ๆ ที่มีการใช้สารทำละลาย เช่น โทลูอิน เบนซีน และบิวตาดีน มีรายงานการเจ็บป่วยส่วนใหญ่ใช้หน่วยวัดความเจ็บป่วย เป็นความเสี่ยงสัมพัทธ์ (Relative risk) มากกว่าความเสี่ยงจริง (Absolute risk) คือ การดูแลสุขภาพแวดล้อมในการทำงานให้ถูกสุขลักษณะ ยังบกพร่องหลายด้านทั้งด้านเคมี กายภาพ ชีวภาพ การจัดการความสัมพันธ์ของท่วงท่าในการทำงานกับเครื่องจักร และอุปกรณ์การทำงาน สภาพแวดล้อม และสังคมจิตวิทยาของระบบอุตสาหกรรม รวมทั้งความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุ พบว่าโทลูอินสัมพันธ์กับการแท้งบุตรของคิงงานสตรีในโรงงานผลิตเครื่องเสียง ไฟฟ้า และภรรยาคนงานชายในโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง มีอัตราการแท้งบุตรสูงกว่าสตรีทั่วไป นอกจากนี้พบคนงานในอุตสาหกรรมยาง มีอัตราตายจากโรคเส้นเลือด โรคหัวใจ โรคมะเร็ง และอัตราป่วยโรคมุมิแพ้สูงกว่าปกติ คนงานหญิงมีอัตราการเกิดโรคที่กลองเสียง ตับอ่อน ถึงน้ำดี ท่อน้ำดี และอวัยวะสืบพันธุ์สูงกว่าปกติ รวมทั้งพบโรคมะเร็ง กระเพาะปัสสาวะ มะเร็งที่ผิวหนัง มะเร็งเม็ดเลือดขาว มะเร็งระบบน้ำเหลือง และระบบสร้างเม็ดเลือดพบได้มากขึ้น ประเทศไทยมีรายงานโรคโลหิตจาง และโรคพิษเบนซีนเรื้อรัง 11 ครั้ง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530-2536 โดยมากเกิดในโรงงานผลิตรองเท้า กระเป๋า กลองบรรจุเพชรพลอย เด็กปั๊ม เด็กตัดทิว โดยมีอุบัติการณ์ระหว่าง 5-29 ต่อ 100 ประชากร

อภิชัย ลีละศิริ (2543) มะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิด AML (Acute Myeloid Leukemia) เป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาวที่พบได้บ่อยในผู้ป่วยสูงอายุ จากการศึกษาในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าอุบัติการณ์ของ AML เพิ่มขึ้นตามอายุ โดยในปี พ.ศ. 2535 พบอุบัติการณ์ในประชากรทั้งหมด 2.6 ต่อ 1 แสนคน แต่ถ้าดูในผู้ป่วยอายุ 75 ปี พบอุบัติการณ์ 16 ต่อ 1 แสนคน ในประเทศอังกฤษพบถึง 6 ต่อ 1 แสนคน ในผู้ป่วยสูงอายุซึ่งเป็นตัวเลขที่สูงถึง 6 เท่าในประชากรทั่วไป สาเหตุของ AML ที่พบได้แก่ สารเบนซีนซึ่งมีความเสี่ยงสัมพัทธ์ 1.9-10 เท่า ซึ่งการได้รับสารกัมมันตภาพรังสีมี ความเสี่ยงสัมพัทธ์ 2-6 เท่า

อัจจิมา (2547) ได้ทำการศึกษาในคนงานปั๊มน้ำมันเขตเทศบาลนครอุดรธานี ซึ่งมีหน้าที่เติมน้ำมัน ที่สัมผัสและมีหน้าที่เกี่ยวข้องโดยตรง 117 คน และกลุ่มควบคุม 48 คน จากการศึกษาตรวจพบว่า ระดับฟินอลในปัสสาวะกลุ่มควบคุมเฉลี่ยเท่ากับ 11.24 ± 5.64 มิลลิกรัม/กรัมครีอาตินิน พนักงานที่มีหน้าที่เติมน้ำมันมีความเสี่ยงในการสัมผัสโดยตรง กับไอระเหยของน้ำมันขณะปฏิบัติงานมากกว่าหน้าที่รับผิดชอบอื่น ตรวจพบระดับฟินอลเฉลี่ย 16.7 ± 18.87 มิลลิกรัม/กรัมครีอาตินิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าคนงานในปั๊มน้ำมันมีความเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสเบนซินสูง

Mi-Young Lee & Seong-Kyu Kang(n.d.) ได้ศึกษาการขับของเสียในอาสาสมัคร 2 คน ที่ได้รับเบนซินในเวลา 2-4 ชั่วโมงที่ความเข้มข้น 47-110 ppm พบการขับของเสียออกจากร่างกาย 16-41% ของการดูดซึมผ่านทางปอดเป็นเวลา 5-7 ชั่วโมง และยังคงมีเบนซินเหลือในปัสสาวะ .07-0.2% จากการศึกษาในกระต่ายโดยใช้ ^{14}C -label (สารกัมมันตรังสี) ในโมเลกุลของเบนซิน การได้รับทางปาก จะกำจัดออกโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปในอากาศที่หายใจออกประมาณ 43% ของปริมาณที่ได้รับ และ 35% ของการแตกตัวของสารกัมมันตรังสีในปัสสาวะ สามารถแยกองค์ประกอบได้ดังนี้ คือ Phenol 68%, Hydroquinone 14%, Catechol 6%, trans,trans-Muconic acid 4% Phenylmercapturic acid 1% และ 1, 2, 4-Trihydroxybenzene 1% ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกับการขับของเสียออกจากร่างกายในมนุษย์ แมวและสุนัข จากการติดตามอาสาสมัครในระหว่าง 32 ชั่วโมงของการได้รับเบนซิน ^{14}C -label ทางผิวหนังที่ความเข้มข้น 0.0024 mg/cm^2 จะมีการขับของเสียทางปัสสาวะ 0.0023 % ของปริมาณที่รับ ซึ่งการขับของเสียออกจากร่างกายจะมากที่สุดภายใน 2 ชั่วโมงแรก และมากกว่า 80 % จะถูกขับออกภายใน 8 ชั่วโมง

Docter HJ and Zielhuis (1967) ทำการศึกษาค่าเมแทบอลิท์ในปัสสาวะของคนปกติที่ไม่ได้รับสัมผัสเบนซิน ตรวจพบฟินอลในปัสสาวะประมาณ 5-10 mg/l สูงสุดประมาณ 15-20 mg/l และคนที่ได้สัมผัสเบนซิน 25 ppm ตรวจพบฟินอลในปัสสาวะประมาณ 170-195 mg/l

William , NIOSH Criteria document (1974) สารเมแทบอลิท์ของเบนซินในปัสสาวะจะถูกขับออกมาในรูปฟินอล 40% ไฟโรแคทิกอล 3% และไฮโดรควิโนน 1% ซึ่งจะมีขบวนการขับของเสียออกจากร่างกายภายใน 24-48 ชั่วโมง สำหรับการได้รับสัมผัสไอระเหยของเบนซิน 1 ครั้ง

Flanagan R.J. et. al. (1993) จากการศึกษาพบว่าสารเมแทบอลิท์หลักของเบนซินที่ถูกขับออกทางปัสสาวะ คิดเป็นร้อยละของปริมาณการดูดซึมดังนี้คือ Phenol 51-87%, Catechol 6%, Hydroquinone 2% และ trans,trans-Muconic acid จึงถือได้ว่าระดับความเข้มข้นของฟินอลในปัสสาวะเป็นดัชนีวัดการได้รับสัมผัสเบนซิน

Eller PM (1994) จากรายงานของ EPA Department of Health and Human Service และสถาบันวิจัยโรคมะเร็งของอเมริกา จัดเบนซินเป็นสารก่อมะเร็ง EPA คาดการณ์ว่าช่วงเวลาในการได้รับสัมผัสเบนซิน 4 ppb ในอากาศ จะเพิ่มการเป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาว 1 ใน 10,000 คนที่ได้รับสัมผัส และที่ความเข้มข้น 100 ppb ในน้ำมัน จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดมะเร็ง 1 ใน 10,000 คนที่ได้รับสัมผัส จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว กับการได้รับเบนซินในปริมาณน้อยจากการประกอบอาชีพ (น้อยกว่า 1 ppm) พบว่าไม่มีข้อพิสูจน์ที่แน่ชัด แต่จากการศึกษากลุ่มควบคุมพบมีความสัมพันธ์กับการเกิด Acute nonlymphocytic leukemia (AML) ในคนขับรถบรรทุก และคนงานในปั้มน้ำมัน

Schnatter A.Robert (1996) องค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา รายงานเมื่อปี ค.ศ. 1985 ว่าทุกๆปีในสหรัฐอเมริกามีคนตาย 234 คนโดยประมาณ เนื่องจากโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว ชนิดที่เกี่ยวกับการสร้างเซลล์ในระบบประสาทส่วนกลาง โดยเป็นผลจากสารมลพิษของเบนซินที่ปนเปื้อนอยู่ภายนอกอาคาร และอาจจะมียีกประมาณ 500 คนต่อปีที่ตายด้วยมลพิษในตัวอาคาร โดยไม่ได้นำเอาค่าความปลอดภัยของสารในบรรยากาศ และค่าความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างขนาดความเข้มข้นของสารพิษที่ร่างกายได้รับ กับปฏิกิริยาตอบโต้ที่เกิดขึ้นมาใช้ในการประเมิน

Pieter J. Boogaard and Nico J. van Sittert(1996) พบฟินอลไม่เหมาะสมที่จะเป็นดัชนีทางชีวภาพการสัมผัสสารเบนซินที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 5 ppm(TWA 8 ชั่วโมง) S-Phenylmercapturic acid (S-PMA) trans-trans-Muconic acid (tt-MA) เป็นเมแทบอลิโทรองของเบนซิน ทำการศึกษาดัชนีทางชีวภาพในการได้รับสัมผัสในระดับต่ำ โดยการสุ่มตรวจตัวอย่างปัสสาวะ จำนวน 434 คน กลุ่มตัวอย่างเป็นคนงานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี 188 คน และกลุ่มควบคุมเป็นคนทำงานที่ไม่อาชีพสัมผัสสารเบนซิน จำนวน 55 คน ทำการตรวจความเข้มข้นของเบนซินในอากาศหายใจ โดยติดอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตัวบุคคล ทำการตรวจวิเคราะห์หลังเลิกทำงาน พบว่าจากการได้รับสัมผัสเบนซินในอากาศที่ความเข้มข้น 1 ppm มีความสัมพันธ์กับ S-PMA 21 mol/mol creatinine, tt-MA 1.5 mol/mol creatinine ในการได้รับสัมผัสตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า S-PMA เป็นดัชนีชีวภาพได้ดีกว่า tt-MA

Rothman N et.al (1998) ศึกษาการได้รับสัมผัสเบนซินทางการหายใจ ตลอดระยะเวลาการทำงานของคนงาน จำนวน 38 คน โดยการตรวจสารเมแทบอลิโทของเบนซินในปัสสาวะคือ ฟินอล แคทาคอล ไฮโดรควิโนน และกรดมิวโคนิก ด้วยเครื่อง GC-MS สำหรับกลุ่มคนงานจำนวน 27 คน มีระดับฟินอลในปัสสาวะมากกว่า 50 mg/g creatinine (เป็นตัวชี้วัดที่เฉพาะในการได้รับสัมผัสเบนซิน) แล้วนำสารเมแทบอลิโททั้งหมดในปัสสาวะ ไปหาความสัมพันธ์กับการได้รับเบนซินมากกว่า

25ppm และ/หรือน้อยกว่า 25 ppm ตลอดระยะเวลา 8 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างฟีนอลและแคทีกอล ตรวจพบสารเมแทบอลิท์เพิ่มขึ้น 6% และ 22.2% ในกลุ่มคนงานที่ได้รับสัมผัสเบนซินที่ความเข้มข้นสูง และจากความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรควิโนน และกรดมิวโคนิค พบสารเมแทบอลิท์จะลดลง 18.8% และ 26.7% จึงสรุปได้ว่าแคทีกอล เป็นตัวชี้วัดการได้รับสัมผัสสารเบนซินที่ความเข้มข้นสูงได้ดีกว่าองค์ประกอบอื่น

Agency for Toxic Substance and Disease Registry [ATSDR] (2000) เบนซินถูกสกัดมาใช้ครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1825 โดยนำมาใช้เป็นสารทำละลาย เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ตัวอื่น และเริ่มรู้จักมากขึ้นโดยการนำเบนซิน มาใช้เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเบนซิน เพื่อป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์และเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมัน ประเทศออสเตรเลีย กำหนดมาตรฐานน้ำมันเบนซินในปี ค.ศ. 1998 ให้มีสารเบนซินเป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซินได้ไม่เกิน 2.9% น้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่ว 2.6% น้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทนสูง 3.3% โดยปริมาตร ในปี ค.ศ. 2000 ให้มีเบนซินเป็นองค์ประกอบได้ไม่เกิน 1% และจะมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ.2006 ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบ Catalytic Convertor ที่มีความสำคัญต่อการลดลงของเบนซินในไอเสียรถยนต์ สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกาใช้เบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทน และป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ ในน้ำมันเบนซิน 2% โดยปริมาตร แต่บางเมืองมีความเข้มข้นสูงถึง 5% จากการศึกษาในมนุษย์ ที่ได้รับสัมผัสเบนซินในอากาศความเข้มข้น 50 ppm หลังการได้รับสัมผัส 4 ชั่วโมง เบนซินเข้าสู่ร่างกาย โดยทางการหายใจประมาณ 50% และพบว่า 17% ของการได้รับสัมผัส จะถูกขับออกทางปอดโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปที่ความเข้มข้น 52-62 ppm ค่าครึ่งชีวิตที่อยู่ในทางเดินหายใจ อยู่ที่ 1,3 และมากกว่า 15 ชั่วโมง ค่าครึ่งชีวิตที่ขับออกทางปัสสาวะในรูปของนอล อยู่ที่ 5.7 และ 28 ชั่วโมง ประมาณ 33% ของการได้รับจะถูกขับออกมาทางปัสสาวะ ซึ่งอยู่ในรูปของฟีนอลเป็นส่วนใหญ่ ส่วนน้อยในรูปของ Muconic acid และ S-phenyl-N-acetyl cysteine

ผลการศึกษาที่สนับสนุนความสัมพันธ์ระหว่างการได้รับสัมผัสเบนซิน กับการเป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาว ของคนงานในโรงงานอุตสาหกรรมรองเท้าจำนวน 28,500 คน ในระหว่างการทำงาน ได้รับเบนซินที่ความเข้มข้น 210-650 ppm ในการทำงาน 1-15 ปี พบว่าในแต่ละปีมีอัตราการเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาวเท่ากับ 13/100,000 ในประชาชนทั่วไปเท่ากับ 6/100,000พบว่ากลุ่มอาชีพที่มีความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสเบนซินดังนี้คือ คนงานในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ปิโตรเลียม ถ่านหิน พลาสติก อุตสาหกรรมที่เก็บและขนส่งเบนซิน ซึ่ง OSHA คาดว่าในสหรัฐอเมริกามีคนงานจำนวน 238,000 คน ได้รับสัมผัสเบนซินขณะทำงานในอุตสาหกรรมขนส่ง อุตสาหกรรมเคมี พลาสติก และยาง พบว่ามีคนงานจำนวน 1000 คน หรือประมาณ 4% ได้รับสัมผัสเบนซินมากกว่า 1 ppm และประมาณ 0.2% ได้รับสัมผัสมากกว่า 10 ppm ตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังพบว่า การสูบบุหรี่ 1 ซองต่อวัน จะได้รับสัมผัสเบนซีนประมาณ 1 mg หรือประมาณ 3-4% ของจำนวนที่ได้รับทางการหายใจจากการทำงาน

Ong CN et al. (2000) ศึกษาดัชนีชีวภาพในปัสสาวะสำหรับผู้ประกอบอาชีพที่ได้รับสัมผัสเบนซีน พบว่าฟีนอลในปัสสาวะไม่เฉพาะเจาะจง สำหรับการได้รับสัมผัสเบนซีนที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 5 ppm แต่ในทางตรงกันข้ามกรณีวโคนิค และไฮโดรควิโน พบว่ามีความเฉพาะเจาะจงและไวต่อเบนซีนที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ppm

Yoonho Choi (2000) จากการศึกษาดัชนีชีวภาพของเบนซีนในกลุ่มประชาชนที่อาศัยอยู่ใกล้อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในประเทศเกาหลี พบอากาศภายในบ้านมีปริมาณสารเบนซีนสูงกว่านอกบ้าน และผลการตรวจทางชีวภาพ พบว่า ไม่สามารถตรวจหาฟีนอลได้ เนื่องจากได้รับสัมผัสสารเบนซีนที่ความเข้มข้นน้อยกว่า ppm

Irene Figa (2001) ศึกษาการได้รับสัมผัสเบนซีนในกลุ่มอาชีพที่ทำงานในบริษัทขนส่งน้ำมัน ศึกษาในคนงานชายจำนวน 25 คน ที่ได้รับสัมผัสสารเบนซีนจากสิ่งแวดล้อม ตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง โดยตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นกรดมิวโคนิคในปัสสาวะเป็นดัชนีวัดการสัมผัสทางชีวภาพ ตรวจพบระดับความเข้มข้นกรดมิวโคนิคในปัสสาวะ 6.6-14.3 mg/l และ 7 mg/l ซึ่งมีสัมพันธภาพกับความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ 20 mg/l จึงถือได้ว่ากรดมิวโคนิค เป็นสารเมแทบอลิท์ที่ได้รับสัมผัสสารเบนซีนในปริมาณน้อย

Mtti Hakkola (2001) ศึกษาองค์ประกอบของอากาศ จากการระเหยของน้ำมันเบนซีนไร้สารตะกั่วในคลองน้ำมัน และรถบรรทุกที่ขนถ่ายน้ำมัน ตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง โดยทำการตรวจวัดไอระเหยในอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิด ตรวจพบองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ดังนี้คือ เบนซีน 0.15 mg/m³ โทลูอิน 0.77 mg/m³ ไตรเมทิลเบนซีน 0.55 mg/m³ ไซลีน 0.81 mg/m³ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นรวม 11.4 mg/m³ ผลการตรวจเมแทบอลิท์ของสารอินทรีย์ต่างๆ ในปัสสาวะของคนงานหลังเลิกงาน จำนวน 13 ตัวอย่าง ตรวจพบเบนซีน 9 nmol/l โทลูอิน 5 nmol/l ไซลีน 8 nmol/l และไตรเมทิลเบนซีนน้อยกว่า 5 nmol/l ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของเบนซีนในบรรยากาศ ในบริเวณที่ทำงานตรวจพบที่ความเข้มข้น 6.6 ppm และในปัสสาวะตรวจพบ 0.1 ppm (ค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง)

Mi-Young Lee (2001) ประเมินการได้รับสัมผัสเบนซีนในประเทศเกาหลี เนื่องจากมีการนำสารเบนซีนมาใช้ในสีทา โรงพิมพ์ และการชะล้าง จนกระทั่งพบว่า มีผู้ป่วยมะเร็งเม็ดเลือดจากเบนซีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองและมนุษย์ จากการศึกษาทางระบาดวิทยา พบว่าการได้รับสัมผัสเบนซีนที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 10 ppm มีความสัมพันธ์กับการเกิด Acute myelogenous

leukemia และความเป็นพิษของเบนซีนมีผลต่อการเกิด Lymphatic cancer หรือ Myelogenous cancer เป็นอย่างมาก

จากการรายงานผลการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องเลือด ในปี ค.ศ.2000 พบผู้ป่วยจำนวน 9,768 คน เป็นโรค Acute myelogenous leukemia จำนวน 926 คน โรค Myelodysplastic 634 คน และเกิด Aplastic anaemia 480 คน โดยทั่วไป 10-20% ของการเป็นมะเร็งเม็ดเลือด มีสาเหตุมาจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อมในโรงงานอุตสาหกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาการได้รับสัมผัสเบนซีนในอากาศ และดัชนีทางชีวภาพในคนงานที่ได้รับสัมผัสเบนซีนจากการประกอบอาชีพ

ผลการตรวจวิเคราะห์อากาศในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารเบนซีน จำนวน 5 แห่ง ตรวจพบเบนซีนในอากาศเฉลี่ย 0.139 ± 0.152 ppm ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เบนซีนเป็นตัวทำละลายในการสกัดแยก ตรวจพบเฉลี่ย 1.079 ± 1.417 สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เบนซีนทั่วไป เช่น โรงงานทำรองเท้าตรวจพบเฉลี่ย 0.08 ± 0.581 ppm และในโรงพิมพ์ตรวจพบเฉลี่ย 0.017 ± 0.0121 ppm

ผลการศึกษาดัชนีทางชีวภาพ โดยการตรวจสารเมแทบอลิท์ในคนงานโรงงานผลิต Carbomer (เป็น โพลีเมอร์ของ Acrylic acid) จำนวน 57 คน ตรวจพบ trans,trans-Muconic acid ในปัสสาวะ เฉลี่ย 1.05 ± 0.685 mg/1 พบสูงสุด 1.47 ± 0.799 mg/1 และฟีนอลในปัสสาวะเฉลี่ย 9.5 ± 7.11 mg/1 แต่อย่างไรก็ตามฟีนอลในปัสสาวะ เป็นตัวบ่งชี้ที่ไม่เหมาะสมในการได้รับสัมผัสเบนซีนในอากาศ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ดัชนีชีวภาพการได้รับสัมผัสเบนซีนในอากาศ

Benzene in air	No. of data	Urinary t,t-MCA				Urinary t,t-MCA			
		No correction		Correction With creatinine		No correction		Correction with creatinine	
		Mean	SD	Mean	SD	mean	SD	mean	SD
The same or less than 0.1 ppm	22	0.85	0.501	0.46	0.268	7.6	5.16	8.4	5.85
0.1 – 1.0 ppm	28	1.14	0.750	0.59	0.255	10.9	8.46	11.8	8.88
The same or more than 1.0 ppm	7	1.34	0.825	0.71	0.82	11.7	6.58	12.3	6.94
F-value		1.88		2.549		1.605		1.453	
F-value		0.161		0.088		0.210		0.243	

ที่มา: Mi-Young Lee, 2001

NICNAS (2001) จากการศึกษพบว่าคนงานในอุตสาหกรรมผลิตหรือใช้เบนซีน มีความเสี่ยงสูงในการได้รับสัมผัสเบนซีน จากข้อมูล OSHA (1985) มีคนงานจำนวนประมาณ 17,336 คน เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง ได้รับสัมผัสเบนซีน 5.1 –10 ppm ซึ่งมีการปนเปื้อนในอาหาร น้ำดื่ม และจากการสูบบุหรี่ (ในผู้ใหญ่ที่น้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ได้รับสัมผัสจากการดื่มน้ำ ประมาณ 2.86 กรัม/กิโลกรัม/วัน จากการสูบบุหรี่ 20 มวน/วัน ประมาณ 7.8 กรัม/กิโลกรัม/วัน และเนื่องจากมีที่พักอาศัยใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรมเคมีที่เป็นหน่วยผลิต ประมาณ 2.76 กรัม/กิโลกรัม/วัน (ATSDR, 199) พบว่าผลจากการสูบบุหรี่ 1 ซอง/วัน จะได้รับสัมผัสสารเบนซีนทางการหายใจประมาณ 1 mg หรือประมาณ 3-4% ต่อวัน จากได้รับสัมผัสของกลุ่มคนงานที่เป็นกลุ่มเสี่ยง และพบว่าในควันบุหรี่จะมีเบนซีน 0.4 – 104 ug/มวน

Crebelli R et.al. (2001) ศึกษาการได้รับสัมผัสสารเบนซีน จากไอระเหยของสารที่เกิดจากการจราจรของคนทำงานในเมือง วิธีดำเนินการทำการศึกษาระหว่างเดือนธันวาคม ค.ศ. 1998 ถึง มิถุนายน ค.ศ. 1999 ตรวจวัดการแพร่กระจายของสารเคมีในอากาศ รวมทั้งตรวจการได้รับสัมผัสสารเบนซีน และอัลคิลเบนซีน ในขณะที่ทำงานของตำรวจจราจรจำนวน 139 คน จากสำนักงานตำรวจจำนวน 63 แห่ง ที่ตั้งอยู่ใจกลางเมือง Rodiello ประเทศอิตาลี ทำการตรวจวัดการได้รับสัมผัสสารเคมีในอากาศแบบ Personal และตรวจวัดทางชีวภาพการได้รับสัมผัสเบนซีน คือตรวจเบนซีนในเลือด t,t-Muconic acid และ S-Phenylmercapturic acid ในปีสภาวะก่อนและหลังการทำงาน เปรียบเทียบกับตำรวจที่ทำงานในสำนักงานจำนวน 124 คน จากสำนักงานตำรวจ 58 แห่ง ผลการศึกษา TWA การได้รับสัมผัส พบว่าตำรวจจราจรได้รับสัมผัสเบนซีนสูงกว่าตำรวจที่ทำงานในสำนักงานมีค่าเฉลี่ย 6.8 และ 3.51 ug/m³ ตามลำดับ ผลการตรวจเบนซีนในอากาศขณะทำงานของตำรวจจราจรมีค่าเฉลี่ย 12.6 ug /m³ พบว่ามีความสัมพันธ์กับผลการตรวจเบนซีนในเลือดที่มีค่าสูงขึ้น แต่ S-Phenylmercapturic acid และ t,t-Muconic acid มีค่าสูงขึ้นจากการสูบบุหรี่ และไม่สูบบุหรี่ในการทำงาน สรุปผลการศึกษาพบว่า การได้รับสัมผัสเบนซีนขณะทำงานในการจราจรที่ความคับคั่งน้อยและปานกลาง มีความสัมพันธ์ มากกว่าการที่ทำงานในสำนักงาน และการสูบบุหรี่มีความสำคัญกับการได้สัมผัสในคนที่ทำงานในสำนักงาน และนอกสำนักงาน

Suramya et al. (2001) ศึกษาดัชนีการได้รับสัมผัสสารเบนซีน ในกลุ่มอาชีพที่ได้รับสัมผัสและไม่ได้รับสัมผัสเบนซีนในเมืองเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน ทำการตรวจวิเคราะห์หาสารเมแทบอลิท์ด้วยเครื่อง Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) จากปริมาณที่ได้รับสัมผัสสารเบนซีนประมาณ 17% ถูกขับออกจากร่างกายทางลมหายใจออก และประมาณ 83% จะถูกดูดซึมในร่างกาย และบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นสารเมแทบอลิท์ เพื่อขับออกทางปัสสาวะ ทำการศึกษาในกลุ่ม

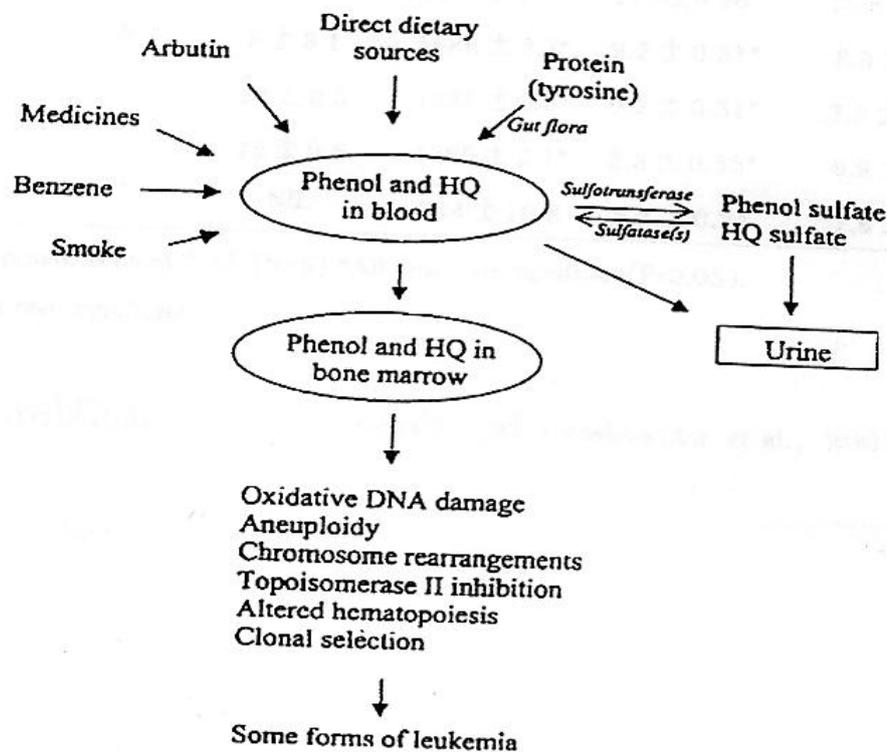
ควบคุมที่ได้รับสัมผัสเบนซินที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 30 ppm และกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับสัมผัสมากกว่า 31 ppm ในช่วง 1.65-329 ppm) เป็นประจำ

เตรียมตัวอย่างโดยใช้ Headspace solid phase microextraction ในปัสสาวะ 0.5 ml แล้วตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-MS ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างและมีค่าความไวต่ำกว่าวิธีอื่น (ค่าต่ำสุดที่ตรวจวัดเบนซินในปัสสาวะ 0.016 ug/l) ในการได้รับสัมผัสเบนซินต่อวันประมาณ 31 ppm. (ช่วง 1.65-329 ppm) เมื่อกลุ่มควบคุมได้รับสัมผัสเบนซิน \leq 31 ppm (n=22) และมากกว่า 31 ppm (n=20) พบระดับเบนซินในปัสสาวะมีค่ามัธยฐานเท่ากับ 0.069 ug/l 4.95 ug/l และ 46.1 ug/l ตามลำดับ (Spearman $r = 0.879$, $P < 0.0001$) ในกลุ่มตัวอย่างมีค่าความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่าง logarithm ของเบนซินในปัสสาวะ และการได้รับสัมผัสจากสมการ In (Urinary benzene = UB, ug/l) = 0.196 + 0.709 In (expose, ppm) ($r = 0.717$, $P < 0.001$) พบว่ามีความสัมพันธ์กับ logarithm ของสารเมแทบอลิท์ของเบนซินในปัสสาวะ 4 ชนิด คือ t,t Mucomic acid ($r=0.983$, $P < 0.0001$) Phenol ($r = 0.826$, $P < 0.0001$) Catechol ($r = 0.812$, $P < 0.0001$) และ Hydroquinone ($r = 0.898$, $P < 0.0001$) อัตราส่วนระดับสารเมแทบอลิท์รวมในปัสสาวะจะไปยังเอ็นไซม์ CYP450 ซึ่งเป็นเอ็นไซม์ที่เพิ่ม Phenol และ Catechol มากกว่า Hydroquinone และ Mucomic acid ในกลุ่มควบคุมตรวจพบเบนซินในปัสสาวะเฉลี่ย 0.145 ug/l (ในช่วง 0.027-2.06 ug/l) และกลุ่มอาชีพที่ได้รับสัมผัสเบนซินต่ำกว่า 10 ppm ตรวจพบเบนซินในปัสสาวะเฉลี่ย 5.63 ug/l (ในช่วง 0.837-26.38 ug/l) ข้อเสนอแนะจากการศึกษา พบว่าเบนซินในปัสสาวะเป็นตัว บ่งชี้ที่ดี สำหรับการได้รับสัมผัสเบนซินในปริมาณต่ำ

McDonald Ta et al. (2001) ศึกษาในประเทศจีน ในกลุ่มผู้ประกอบอาชีพที่สัมผัสสารเบนซิน 0, 1-31 ppm หรือมากกว่า 31 ppm ตรวจพบระดับความเข้มข้นของฟินอลในปัสสาวะ 4.55 ppm , 16-487 ppm และ 28-517 ppm ตามลำดับ สารเมแทบอลิท์ฟินอลเป็นดัชนีชีวภาพการได้รับสัมผัสเบนซินในปริมาณสูงได้ดี แต่เป็นดัชนีชีวภาพที่ไม่เหมาะสมกับการได้รับสัมผัสสารเบนซินในปริมาณน้อย คือ 1-5 ppm ผลการศึกษาในคนที่ไม่มีอาชีพสัมผัสเบนซินตรวจพบฟินอลในปัสสาวะ 10 ppm (13 ug/mgCr) และไฮโดรควิโนน 4 ppm (5 ug/mg Cr) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง 5-25 เท่า ในเพศหญิงและชาย ตรวจพบระดับ ฟินอลในปัสสาวะมีความแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเข้มข้นฟินอล และไฮโดรควิโนนในปัสสาวะ คนที่ไม่ได้รับสัมผัสจากการประกอบอาชีพคือ

- ยา ประชาชนทั่วไปที่ซื้อยาจากร้านขายยา เช่น ในอาสาสมัครที่กินยา Pepto Biosmol 2 ออนซ์ ตรวจพบฟินอลในปัสสาวะเพิ่มขึ้น 40 เท่า หรือ 260 ppm และการกินยา Chloraseptic lozenges ตรวจพบฟินอลในปัสสาวะ 270 ppm

- ควัน ควันจากบุหรี่ และควันจากการเผาไหม้ของไม้ตรวจพบฟีนอล แคทาคอลและไฮโดรควิโนน เช่นเดียวกับการสูบบุหรี่ที่ไม่มีก้นกรอง ตรวจพบฟีนอล 40 ug/มวน แคทาคอล 140-500 ug/มวน และไฮโดรควิโนน 150-450 ug/มวน และไฮโรควิโนน 150-450 ug/มวน และพบว่าในคนที่สูบบุหรี่มีความเสี่ยงการเกิดมะเร็งเม็ดเลือด ประมาณ 50%
 - อาหาร และเครื่องดื่มทั่วไป (Diet) เช่น เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์
- ปัจจัยที่มีผลต่อฟีนอลในปัสสาวะ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ปัจจัยที่มีผลต่อระดับฟีนอล และไฮโดรควิโนนในร่างกาย

(McDonald Ta et al., 2001)

Yeshvandra et al.(2001) ศึกษาการได้รับสัมผัสเบนซีนโดยตรวจวัดฟีนอลในปัสสาวะในคนงานปั้มน้ำมัน และร้านซักแห้ง ในเมืองมิร์ท ประเทศอินเดีย ตรวจพบค่าเฉลี่ยฟีนอลในปัสสาวะคนงานในปั้มน้ำมันสูงกว่า คนงานในร้านซักแห้ง และพบว่าคนที่ดื่มแอลกอฮอล์จะมีฟีนอลในปัสสาวะมากกว่าในคนที่สูบบุหรี่และไม่รับประทาน

มังสวิรัต จึงสรุปได้ว่าแอลกอฮอล์มีผลต่อเมแทบอลิซึมของสารเบนซีน ผลการศึกษาคนที่ได้รับสัมผัสเบนซีน จาก 3 ปัจจัย คือ การดื่มแอลกอฮอล์ การสูบบุหรี่ และไม่รับประทาน มังสวิรัต แสดงผลดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2 การได้รับสัมผัสเบนซีนในกลุ่มคนที่ดื่มแอลกอฮอล์

Group	Location	Work exposure (year)	Creatinine (mg/l)	Phenol (mg/l)	Phenol corrected to creatinine (mg/g creatinine)
Petrol pump	A	3±0.8	1358±2.5*	13.4±0.4*	11.4±1.9*
Workers	B	6±0.7	1089±3.8*	17.0±0.36*	16.5±2.4*
	C	11±0.5	1326±2.2*	17.5±0.36*	15.8±2.3*
Dry-cleaners	A	5±3.1	1086±3.7*	9.2±0.31*	8.9±0.7*
	B	20±0.5	1225±6.5*	9.2±0.31*	7.5±0.4 ^{NS}
	C	25±0.6	1360±3.1*	8.3±0.33*	6.9±0.9*
Control		NIL	794±10.8	6.2±0.24	7.8±0.31

Results are exposure as mean ±SE (N=5)*All means are significant (P<0.05)

NS-means are non-significant

ที่มา: Yeshvandra et al., 2001

ตารางที่ 3 การได้รับสัมผัสเบนซีนในกลุ่มคนที่สูบบุหรี่

Group	Location	Work exposure (year)	Creatinine (mg/l)	Phenol (mg/l)	Phenol corrected to creatinine (mg/g creatinine)
Petrol pump	A	3±0.8	1430±3.1*	8.2±0.31*	5.4±0.8*
Workers	B	6±0.7	1358±2.5*	13.4±0.04*	11.4±1.9*
	C	11±0.5	1362±2.2*	17.5±0.36*	15.8±2.3*
Dry-cleaners	A	5±3.1	1150±3.1*	9.7±0.6*	7.4±0.8*
	B	20±0.5	1125±6.5*	9.2±0.31*	7.5±0.4 ^{NS}
	C	25±0.6	1358±2.5*	12.9±0.64*	8.8±0.6*
Control		NIL	794±10.8	6.2±0.24	7.8±0.31

Results are exposure as mean ± SE(N=5) *All means are significant (P<0.05).

NS-means are non-significant

ที่มา: Yeshvandra et al., 2001

ตารางที่ 4 การได้รับสัมผัสเบนซินในกลุ่มคนที่ไม่ได้รับประทานมังสวิรัต

Group	Location	Work exposure (year)	Creatinine (mg/l)	Phenol (mg/l)	Phenol corrected to creatinine (mg/g creatinine)
Petrol pump	A	3±0.8	1430±3.1*	802±0.31*	5.4±0.8*
Workers	B	6±0.7	1630±3.1*	9.2±0.31*	5.0±0.8*
	C	11±0.5	1225±6.5*	12.4±1.22*	7.0±0.9*
	A	5±3.1	1360±3.1*	8.3±0.33*	6.9±0.9*
Dry-cleaners	B	20±0.5	1705±3.1*	15.0±1.6*	10.2±2.0*
	C	25±0.6	1224±3.7*	15.4±1.1*	18.2±1.2*
	Control	NIL	794±10.8	6.2±0.24	7.8±0.31

Results are exposure as mean ± SE (N=5) *All means are significant (P<0.05).

NS-means are non-significant

ที่มา: Yeshvandra et al., 2001

Peter P. Egeghy. Et al.(2002) ศึกษาการได้รับสัมผัสเบนซินในระดับต่ำ โดยการสุ่มลมหายใจของช่างซ่อมเครื่องยนต์ เนื่องจากพบว่าช่างซ่อมเครื่องยนต์มีโอกาสได้รับเบนซินจากไอระเหยของน้ำมันเบนซิน และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์การได้รับสัมผัสทางการหายใจในกลุ่มที่มีการป้องกันที่ดี และกลุ่มที่ไม่มีการป้องกันการได้รับสัมผัสสาร (Intraclass correlation coefficient 0.79, n = 69) ในอุโมงค์รถยนต์ จำนวน 12 แห่ง ใน North Carolina โดยออกแบบสุ่มเก็บอากาศ และลมหายใจออกจำนวน 3 ครั้งต่อคน ในคนงานที่มีการป้องกันการได้รับสัมผัสสาร จำนวน 81 คน ใช้สถิติหาความแตกต่าง (P < 0.0001, Mann-Whitney rank sum test) ระหว่างกลุ่มที่ไม่สูบบุหรี่ และสูบบุหรี่ หลังการได้รับสัมผัสทางการหายใจออก ตรวจพบค่ามัธยฐานเท่ากับ 18.9 และ 39.1 ug/m³ ตามลำดับ ผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างก่อน และหลังการได้รับสัมผัสทางการหายใจออกในทั้ง 2 กลุ่ม พบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในกลุ่มที่ไม่สูบบุหรี่ (P< 0.0001) แต่พบความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในกลุ่มที่สูบบุหรี่ (P<0.05) และผลการศึกษาโดย Regression analysis สามารถทำนายความเป็นไปได้ 5 หัวข้อคือการได้รับสัมผัสสารเบนซิน (P<0.0001) ก่อนได้รับสัมผัสทางการหายใจ (P = 0.021) การสูบบุหรี่ (P < 0.0001) ลักษณะการทำงานกับน้ำมันเชื้อเพลิง (P = 0.0043) และกลุ่มคนงานที่มีหน้าที่ทำความสะอาด Caburator (P < 0.0001)พบความแตกต่างระหว่างคนเพียง 28% จากจำนวนทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ถึงความแตกต่าง และความสัมพันธ์ระหว่างสรีระร่างกาย และขบวนการเมแทบอลิซึมที่มีผลกระทบต่อกรได้รับสัมผัสสารเบนซินของคนทำงาน

Collins J J et al. (2003) ศึกษาการตายที่เกิดจากมะเร็ง Lymphohaematopoietic ในคนงานในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี จำนวน 4,417 คน พบว่ามีคนงานจำนวนมากที่ได้รับสัมผัสสารเบนซีน แต่มีข้อมูลสนับสนุนน้อยที่จะบ่งบอกความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับสัมผัสสารเบนซีนเพิ่มมากขึ้นแบบสะสม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิด Acute Non-lymphocytic Leukaemias (ANL) หรือ Lymphohaematopoietic และ Leukemias ยกเว้น Multiple myeloma (เนื้องอกที่ประกอบด้วยเซลล์ในไขกระดูก) สำหรับ Multiple myeloma จะมี Standardised Mortality Rate (SmRs) 1.1 (95% CI 0.3-2.5) ในกลุ่มที่ไม่ได้รับสัมผัสสาร SMRs 1.4(95% CI 0.2-5.1) ในที่กลุ่มที่ได้รับสัมผัสน้อยกว่า 1 ppm/ปี และ SMRs 2.6(95% CI 0.7-6.7) ได้รับมากกว่า 6 ppm/ปี พบแนวโน้มการเกิดมะเร็งไม่สูงขึ้นจากการได้รับสัมผัสสารเบนซีน อย่างไรก็ตามเมื่อได้รับสัมผัสสูงกว่า 100ppm จำนวน 40 วันหรือมากกว่า พบการเป็น Leukemias (SMR=2.7, 95% CI 0.8-6.7) ANL (SMR=4.1, 95% CI 0.5-14.9) และ Multiple myelom(SMR=4.0, 95% CI 0.8-11.7) ซึ่งมีจำนวนมากกว่าที่คาดไว้ จากการสังเกตกลุ่มศึกษา พบว่ามีจำนวนการตายน้อยในคนที่ได้รับสัมผัสมากกว่า 100ppm แต่ก็มีความเสี่ยงมากกว่าการได้รับสัมผัสแบบสะสม Dose rate และ Threshold ในการได้รับสัมผัสสารเบนซีน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการประเมินความเสี่ยงการเกิด Lymphohaematopoietic

Yeshvandra et al. (2003) ศึกษาดัชนีทางชีวภาพการรับสัมผัสสารเบนซีนของตำรวจจราจรใน North India พบว่าในปัจจุบันมีความเสี่ยงมากในการได้รับสัมผัสสารเบนซีนทางการหายใจที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงในอากาศ ผลการตรวจหาสารเมแทบอลิท์ ตรวจพบฟีนอลในปัสสาวะมีค่าสูงกว่าค่ากำหนดของ ACGIH (ค่า BEI ของฟีนอล ACGIH, 1996 เท่ากับ 50 mg/g Creatinine ในปัสสาวะหลังการทำงาน) และนอกจากนี้พบว่าพฤติกรรมกรสูบบุหรี่ และการดื่มแอลกอฮอล์ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารเมแทบอลิท์ในร่างกาย ดังแสดงผลในตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5 ค่าครีเอตินินในปัสสาวะตำรวจจราจร (mg/l) ในอินเดีย

City	Traffic policemen					Control
	Alcoholics	Non Alcoholics	Smokers	Nonsmokers	Average	
Delhi	1344.6±2.1 ^{NS}	1581±5.0*	864.7±1.1*	1407±2.2 ^{NS}	1299.3	1362±3.2
Dehradun	1059.6±4.0 ^{NS}	1317±2.5*	856.4±3.4*	1296.2±2.8*	1132.3	1134±1.2
Haridwar	743±1.9 ^{NS}	1117.6±2.7*	709.2±1.0 ^{NS}	1316±1.9*	971.4	824±2.2
Meerut	1280.2±3.1*	1280.8±1.2*	1297.2±2.8*	1135±3.0*	1248.3	751.8±4.2
Muzaffamagar	1186.2±2.9*	529.4±3.0*	825.2±2.6*	610.2±3.5 ^{NS}	787.7	696.2±2.1
Saharanpur	789.2±1.4*	783±3.7*	715±1.2*	625±1.6 ^{NS}	728	696.5±1.0

Results are expressed as mean ± SE (n = 5)* Values are significantly different from control.

NS-non significant. P<0.05.F = 0.678

ที่มา: Yeshvandra et al., 2001

ตารางที่ 6 ฟีนอลในปัสสาวะตำรวจจราจร (mg/l) ในอินเดีย

City	Traffic policemen					Control
	Alcoholics	Non Alcoholics	Smokers	Nonsmokers	Average	
Delhi	116.8±3.2*	144.4±9.1*	129.9±1.5*	126.0±5.5 ^{NS}	129.2	94.0±6.2
Dehradun	82.9±0.82*	120.8±1.0*	95.24±0.77*	103.5±0.45*	100.6	76.5±0.44
Haridwar	94±4.7*	73.0±10.2*	79.2±3.4*	94.26±1.2*	85.1	35.7±0.88
Meerut	115.32±0.5*	119.2±0.77*	115.5±0.44*	123.2±1.6*	118.3	751.8±0.45
Muzaffamagar	66.16±0.29*	108.8±0.29*	1.2.2±0.77*	76.52±0.44*	88.4	44.60±0.83
Saharanpur	74.6±2.8*	82.8±5.4*	71.6±2.1*	47.0±3.2*	69.0	49.7±2.1

Results are expressed as mean ± SE (n=5) *Values are significantly different from controls.

ที่มา: Yeshvandra et al., 2001

ตารางที่ 7 ฟีนอลในปัสสาวะที่คำนวณต่อค่าครีอาตินิน (mg/gCr) ของตำรวจจราจรในอินเดีย

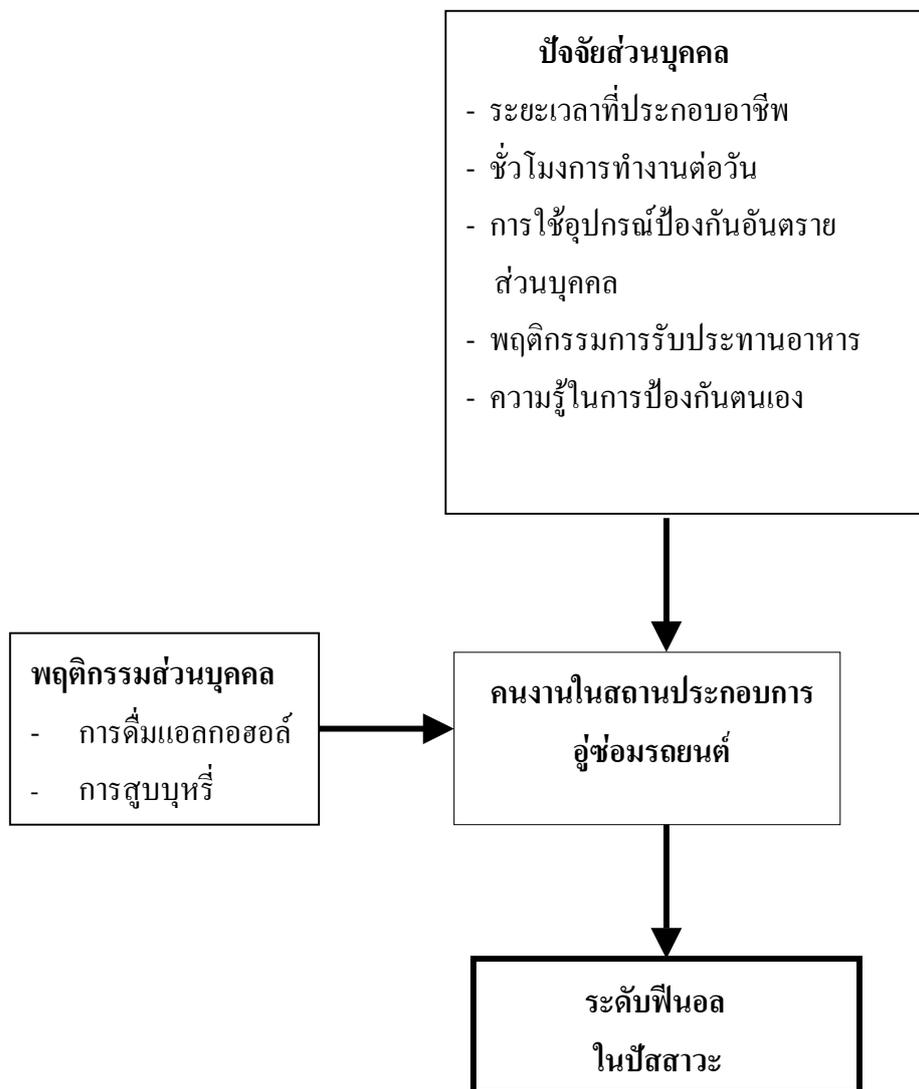
City	Traffic policemen					Control
	Alcoholics	Non Alcoholics	Smokers	Nonsmokers	Average	
Delhi	85.34±2.6*	91.4±6.0*	172±1.6*	95.7±4.2*	111.1	84.69±0.67
Dehradun	77.4±0.722*	91.7±0.65*	110.8±1.0*	79.4±0.48*	89.8	67.4±0.33
Haridwar	126.48±1.2*	65.0±8.1*	134±1.3*	68.9±2.4*	98.5	50.2±4.1
Meerut	89.8±89.8*	92.9±0.69*	88.6±0.17*	108.3±1.4*	94.9	88.4±0.68
Muzaffamagar	55.6±0.12*	204±1.3*	123.6±1.0*	125±1.2*	127	64.0±1.1
Saharanpur	96.56±7.5*	177.9±2.3*	125.6±1.2*	84.4±0.67*	121.1	84.83±0.67

Results are expressed as mean ± SE (n=5) *Values are significantly different from control.

ที่มา: Yeshvandra et al., 2001

7. สรุปแนวคิดจากการทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนทฤษฎีและวรรณกรรม พบว่า สารเบนซีนที่เข้าสู่ร่างกายจะมีการเปลี่ยนแปลงสารเพื่อขจัดออกจากร่างกาย ด้วยระบบเมแทบอลิซึมได้บ ขบวนการเปลี่ยนแปลงนี้จะเปลี่ยนสารดังกล่าวเป็นสารเมแทบอลิท์ เพื่อขจัดออกทางปัสสาวะ โดยส่วนใหญ่เบนซีนจะถูกขจัดออกในรูปของฟีนอล 68% ไฮโดควิโนน 14% แคทคอลล 6% กรดมิวโคนิค 4% กรดเฟนิลเมอร์แคปทอริก 1% การขับของเสียออกจากร่างกายจะมากที่สุดภายใน 2 ชั่วโมงแรกและมากกว่า 80% จะถูกขับออกภายใน 8 ชั่วโมง สำหรับการได้รับสัมผัสไอของเบนซีน 1 ครั้ง ถึงแม้จะมีผลการศึกษาในต่างประเทศอย่างกว้างขวาง เกี่ยวกับการได้รับสัมผัสสารเบนซีนโดยการตรวจวัดดัชนีทางชีวภาพ แต่ในประเทศไทยมีรายงานการศึกษาดัชนีทางชีวภาพการได้รับสัมผัสสารเบนซีนน้อยมาก โดยเฉพาะผู้ประกอบการอาชีพในอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงในการได้รับสัมผัสสารเบนซีนจากการทำงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาระดับฟีนอลในปัสสาวะ เป็นดัชนีทางชีวภาพการได้รับสัมผัสสารเบนซีน ของคนงานในสถานประกอบการอุตสาหกรรมซึ่งปัจจัยเกี่ยวกับอายุการทำงาน และระยะเวลาการปฏิบัติงานต่อวัน ลักษณะงานหรือหน้าที่ที่รับผิดชอบ และพฤติกรรมในขณะที่ปฏิบัติงาน น่าจะสัมพันธ์กับการได้รับสัมผัสสารเบนซีนจากการทำงาน



ภาพที่ 5 กรอบแนวคิดการวิจัย