

EnviroMail™ / Avrupa

No. 32 / Mart 2026

right solutions.
right partner.

Emisyon Numunelerinde PBDD ve PBDF Tayini

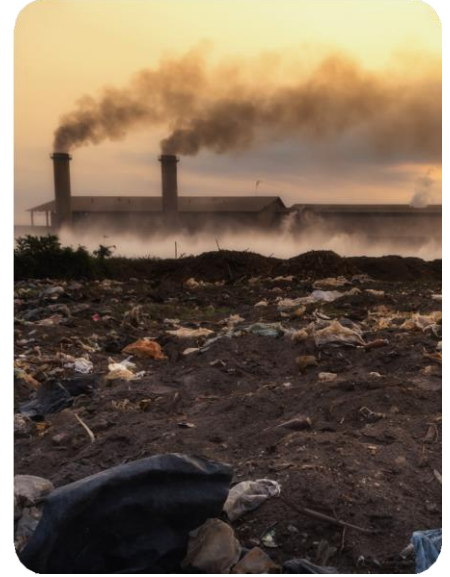
Polibromlu dibenzo-p-dioksiner ve dibenzofuranlar (PBDD/Fs), poliklorlu dibenzo-p-dioksiner ve dibenzofuranların (PCDD/Fs) bromlu analoglarıdır. PBDD/F'ler kalıcı organik kirleticiler (POPs) olarak sınıflandırılır. Bu maddeler çevresel ve biyolojik ortamlarda kalıcılık gösterebilen, biyobirikim yapabilen ve insan ile hayvan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilen toksik bileşiklerdir.

İz seviyelerde bulunabilmelerine rağmen zamanla birikebildikleri için doğru ve güvenilir analiz büyük önem taşır. Bu analizler; maruziyetin değerlendirilmesi, zaman içindeki değişimlerin izlenmesi ve özellikle bromlu alev geciktiriciler içeren prosesler ile termal ve atıkla ilişkili faaliyetlerden kaynaklanan emisyonların belirlenmesi açısından gereklidir.

PBDD/F Giriş

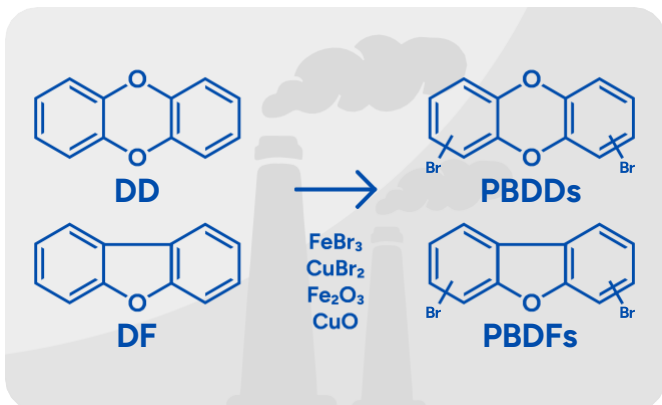
PBDD/F'ler, analitik ve araştırma amaçlarıyla küçük miktarlarda üretilmeleri dışında bilinçli olarak üretilen kimyasallar değildir. Ancak bu bileşikler; bromlu alev geciktiriciler (BFR'ler) veya diğer bromlu organik bileşiklerin bulunduğu ortamlarda malzemelerin ısıtılması veya yakılması sırasında istenmeden oluşabilir.

Ayrıca PBDD/F'ler, polibromlu difenil eterler (PBDE'ler) gibi bazı BFR'lerin üretimi sırasında yan ürün olarak da oluşabilmektedir. Oluştuktan sonra, atık yakma tesisleri ve metalurjik tesisler gibi çeşitli insan kaynaklı faaliyetlerden çevreye salındıkları belgelenmiştir.



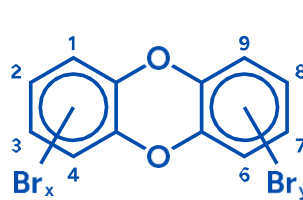
Şekil 1: Örnek Resim

PBDF'ler neredeyse düzlemsel yapıya sahip üç halkalı aromatik bileşiklerdir. Brom atomlarının sayısı ve molekül üzerindeki konumlarına göre farklılık gösterirler. Hem dibenzo-p-dioksin hem de dibenzofuran moleküllerinde halojen ikamesinin gerçekleşebileceği sekiz konum bulunmaktadır. Bu konumlar Şekil 3'te gösterildiği şekilde numaralandırılmıştır. Teorik olarak 75 farklı PBDD ve 135 farklı PBDF bileşiği mümkündür (Tablo 1). En toksik olan konjenerler, 2, 3, 7 ve 8 pozisyonlarında ikame olmuş olanlardır.



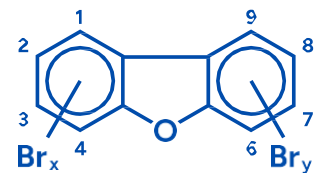
Şekil 2: PBDD/F'lerin oluşumu ve emisyonu

Dibenzo-p-dioxins



Şekil 3: PBDD ve PBDF yapısal formülleri

Dibenzofuranlar



Tablo 1. Olası PBDD ve PBDF konjenerlerinin sayısı

Compound	Substitution	Di	Tri	Tetra	Penta	Hexa	Hepta	Octa	Total
PBDD	2	10	14	22	14	10	2	1	75
PBDF	4	16	28	38	28	16	4	1	135
									Total: 210

► Continues on the next page
(PBDD/F Introduction)

Klorlu analogları (PCDD/F'ler) ile karşılaştırıldığında, bromlu dioksinler ve furanlar daha yüksek molekül ağırlıklarına, daha yüksek erime noktalarına, daha düşük buhar basınçlarına ve daha düşük su çözünürlüğüne sahiptir.

PBDD/F'ler, su ve topraktaki tahmini yarı ömürlerine bakıldığında kalıcı bileşiklerdir. Ayrıca sediment çekirdeklerinde, onlarca yıl önce birikmiş katmanlarda da tespit edilmiş olmaları bu bileşiklerin çevrede uzun süre kalabildiğini göstermektedir. Memelilerde PBDD/F'lerin vücuttan atılma yarı ömürleri, PCDD'lere kıyasla önemli ölçüde daha uzundur; bu da bromlu bileşiklerin yüksek biyobirikim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

PBDD/F'ler özellikle atmosferde partiküllere bağlı şekilde taşınarak uzun mesafeli çevresel taşıma potansiyeline sahiptir. Faroe Adaları çevresindeki pilot balinalarda PBDD/F'lerin tespit edilmesi, bu kimyasalların uzun mesafeli taşınımına örnek olarak gösterilebilir.

PBDD/F'lere Bağlı İnsan Sağlığı Riskleri

PBDD/F'ler hem çevrede (örneğin sedimentlerde, havada ve yaban hayatında) hem de insanlarda tespit edilmektedir. Toplum, PBDD/F'lere başlıca gıda yoluyla (örneğin yumurta, süt, balık ve et), ev içi toz ve geri dönüştürülmüş plastiklerden üretilen tüketici ürünleri (örneğin oyuncaklar) aracılığıyla maruz kalabilmektedir. PBDD/F'ler, PCDD/F'lere benzer olumsuz etkilere neden olabilir. Bu etkiler arasında immünotoksinite (bağışıklık sistemi üzerinde toksik etki), kanserojen etki, üreme ve gelişim toksisitesi yer almaktadır. Bu nedenle hem insanlar hem de yaban hayatı için dioksin benzeri toplam maruziyete katkıda bulunurlar. PBDD/F'lerin yüksek toksisiteyi, özellikle biyobirikim potansiyelleri ile birlikte değerlendirildiğinde önemli bir endişe kaynağı oluşturmaktadır.

Ulusal veya Bölgesel Düzenlemeler

Avrupa Birliği'nde atık yakma tesislerinde PBDD/F hava emisyonlarının altı ayda bir izlenmesi gerekmektedir. Bu izleme; bromlu alev geciktiriciler (BFR'ler) içeren atıkların yakılması veya sürekli brom enjeksiyonu kullanılan kazan sistemleri için uygulanmaktadır (European Commission, 2019). Buna ek olarak, bazı PBDD/F bileşiklerinin ürünlerde bulunması ve çevreye salımı Almanya ve Hollanda'da halihazırda düzenlemeye tabidir. Bromlu dioksinler yüksek derecede toksik, kalıcı ve çevrede ile gıda zincirinde birikebilen maddelerdir. İnsan sağlığı ve ekosistemler üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle bu maddeler şu anda Kalıcı Organik Kirleticilere İlişkin Stockholm Sözleşmesi kapsamında listeye alınması için değerlendirilmektedir.

ALS Laboratuvarlarında PBDD/F Tayini

ALS Çek Cumhuriyeti Laboratuvarı, emisyon matrislerinde PBDD/F tayini için en modern analitik yöntemleri kullanmaktadır. Analizi yapılan PBDD ve PBDF hedef konjenleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. ALS Çek Cumhuriyeti tarafından analiz edilen PBDD/F bileşiklerinin listesi

Number of Br atoms	Target analytes	
	PBDDs	PBDFs
4	2,3,7,8-TBDD	2,3,7,8-TBDF
5	1,2,3,7,8-PeBDD	1,2,3,7,8-PeBDF 2,3,4,7,8-PeBDF
6	1,2,3,4,7,8-HxBDD 1,2,3,6,7,8-HxBDD 1,2,3,7,8,9-HxBDD	1,2,3,4,7,8-HxBDF 1,2,3,6,7,8-HxBDF 1,2,3,7,8,9-HxBDF 2,3,4,6,7,8-HxBDF
7	1,2,3,4,6,7,8-HpBDD	1,2,3,4,6,7,8-HpBDF 1,2,3,4,7,8,9-HpBDF
8	OBDD	OBDF

Bu amaçla yüksek çözünürlüklü kütle spektrometrisi ile eşleştirilmiş gaz kromatografisi (GC-HRMS) veya üçlü kuadrupol tandem kütle spektrometrisi ile eşleştirilmiş gaz kromatografisi (GC-MS/MS) teknikleri kullanılmaktadır. Her iki teknikte de elektron iyonizasyonu uygulanmakta olup, analitik yöntemler ¹³C izotop ile işaretlenmiş standartlar kullanılarak izotop seyreltme yöntemine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, sonuçların yüksek doğruluk ve güvenilirlikte elde edilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen yöntem, konjenere bağlı olarak 0.005–0.300 ng/numune aralığında tayin limitlerine ulaşabilmektedir ve bu nedenle hedeflenen analiz amaçları için uygundur. Nicel GC-MS verilerinin toksisite açısından anlamlı hale getirilebilmesi için PBDD/F'ler için TEQ (toksik eşdeğer) değerleri hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen insan ve memeliler için toksik eşdeğerlik faktörleri (TEF) doğrultusunda yapılmakta olup, PBDD/F konjenleri için PCDD/F konjenleri ile aynı TEF değerlerinin kullanılması önerilmektedir.



Şekil 4: PBDD/F analizlerinde kullanılan GC-MS/MS ve GC-HRMS cihazları

Referanslar

- [LINK](#) Piskorska-Pliszczynska Jadwiga, Maszewski Sebastian: Brominated dioxins: little-known new health hazards – a review, Bull Vet Inst Pulawy (2014) DOI: 10.2478/bvip-2014-0051
- [LINK](#) Dan Li, Rong Cao, Haijun Zhang, Yun Fan, Mingyong Zhou, Haitao Shi, Jiping Chen: Investigation into the bromination of polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans, Journal of Hazardous Materials (2025) DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138505
- [LINK](#) UNEP/POPS/POPRC.21/2 Draft risk profile: polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and mixed polybrominated/chlorinated dibenzop-dioxins and dibenzofurans. 25 June 2025.
- [LINK](#) HEAL response on draft proposal for listing PBDD/Fs and PBCDD/Fs in Annex C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. 19 May 2025.
- [LINK](#) European Commission. (2019). COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2019/2010 of 12 November 2019 establishing the best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for waste incineration. https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2019/2010/oj/eng.
- [LINK](#) Van den Berg Martin, Denison Michael S., Birnbaum Linda S., DeVito Michael J., Fiedler Heidelore, Falandysz Jerzy, Rose M Martin, Schrenk Dieter, Safe Stephen, Tohyama Chiharu, Tritscher Angelika, Tyskind Mats, Peterson Richard E.: Polybrominated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans, and biphenyls: inclusion in the toxicity equivalency factor concept for dioxin-like compounds. Toxicological Sciences (2013) DOI: 10.1093/toxsci/kft070